



TUGAS AKHIR - TL 141584

**SIMULASI NUMERIK PENGARUH VARIASI TEKANAN
TERHADAP DISTRIBUSI *GREEN DENSITY* PADA
KOMPAKSI SERBUK Cu-10%wtSn
DENGAN METODE ELEMEN HINGGA**

**DESHINTA IKASARI
NRP 2713 100 046**

**Dosen Pembimbing :
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.
Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., P.hD**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



TUGAS AKHIR - TL 141584

**SIMULASI NUMERIK PENGARUH VARIASI TEKANAN
TERHADAP DISTRIBUSI *GREEN DENSITY* PADA
KOMPAKSI SERBUK Cu-10%wtSn
DENGAN METODE ELEMEN HINGGA**

**DESHINTA IKASARI
NRP 2713 100 046**

**Dosen Pembimbing :
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.
Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., P.hD**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

(halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL 141584

***NUMERICAL SIMULATION OF EFFECT OF
PRESSURE VARIATION TO GREEN DENSITY
DISTRIBUTION ON Cu-10%wtSn POWDER
COMPACTION BY FINITE ELEMENT METHOD***

DESHINTA IKASARI
NRP. 2713 100 046

Advisor:

Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D

MATERIALS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

SIMULASI NUMERIK PENGARUH VARIASI TEKANAN TERHADAP DISTRIBUSI *GREEN DENSITY* PADA KOMPAKSI SERBUK Cu-10%wtSn DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Material Inovatif
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

DESHINTA IKASARI

NRP. 2713 100 046

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. (Pembimbing 1)

Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 2)



(halaman ini sengaja dikosongkan)

SIMULASI NUMERIK PENGARUH VARIASI TEKANAN TERHADAP DISTRIBUSI *GREEN DENSITY* PADA KOMPAKSI SERBUK Cu-10%wtSn DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama : Deshinta Ikasari
NRP : 2713 100 046
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si
Mas Irfan P. H., S.T., M.Sc., Ph.D

Abstrak

Dalam proses metalurgi serbuk konvensional tidak terlepas dari proses kompaksi dan sintering, dimana kedua proses utama ini saling berkaitan satu sama lain. Kompaksi merupakan proses pemadatan serbuk sehingga menjadi suatu bentuk tertentu. Salah satu kekurangan dari kompaksi adalah heterogenitas dalam distribusi green density yang mengakibatkan lengkungan dan bahkan retakan selama proses ejeksi. Selain itu heterogenitas dalam distribusi green density juga dapat menyebabkan peningkatan distorsi selama proses selanjutnya yaitu sintering. Sehingga persebaran densitas yang seragam adalah hasil yang diinginkan. Suatu model elemen hingga dikembangkan untuk memprediksi distribusi green density pada kompaksi serbuk Cu-10%wtSn, dengan variasi displacement sebagai fungsi tekanan kompaksi yaitu 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 dan 0.065 m. Proses analisis menggunakan perangkat lunak Ansys Mechanical APDL 17.1. Hasil dari simulasi berupa nilai strain, kemudian diubah menjadi nilai densitas relatif melalui persamaan yang diturunkan oleh Coube and Riedel, 2000. Hasil simulasi didapatkan nilai densitas relatif pada displacement 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.065 m berturut-turut sebesar 0.58, 0.66, 0.74, 0.84 dan 1. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar displacement sebagai fungsi tekanan, maka semakin besar pula nilai densitas relatif. Sedangkan hasil simulasi perbedaan densitas relatif tertinggi dan terendah pada displacement 0.02,

0.03, 0.04, 0.05, 0.065 m berturut-turut sebesar 0.0413, 0.0615, 0.0874, 0.0936, dan 0.1703. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar displacement sebagai fungsi tekanan, semakin besar pula perbedaan densitas relatif.

Kata Kunci : green density, kompaksi, serbuk, simulasi numerik

**NUMERICAL SIMULATION OF EFFECT OF PRESSURE
VARIATION TO GREEN DENSITY DISTRIBUTION ON
Cu-10%wtSn POWDER COMPACTION BY
FINITE ELEMENT METHOD**

Name : Deshinta Ikasari
NRP : 2713 100 046
Major : Materials and Metallurgical Engineering
Advisor : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si
Mas Irfan P.Hidayat, S.T., M.Sc., PhD.

Abstract

The conventional powder metallurgy process is inevitable from the process of compaction and sintering that the two main processes are related each other. Compaction is a process of powder densification into a particular bulk form. One of the compaction drawbacks is heterogeneity in green density distribution and even cracks during ejection process. In addition, heterogeneity in the distribution of green density can also cause increase in distortion during the further process of sintering. So that, the uniform density distribution is desired result. A finite element model is developed to predict the distribution of green density on the Cu-10%wtSn powder composition, with displacement variation as a compaction pressure function of 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 and 0.065 m. Analytical process used Ansys Mechanical APDL 17.1. The result of the simulation is a strain value, then converted to a relative density value through the equation derived by Coube and Riedel, 2000. The simulation results showed relative density values at displacement 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.065 m are 0.58, 0.66, 0.74, 0.84 and 1, respectively. This showed that higher displacement, as pressure function, leads higher relative density. While based on simulation result, the range between the highest and lowest relative density on displacement at 0.03, 0.04, 0.05, 0.065 m are 0.0413, 0.0615, 0.08745, 0.0936, and 0.1703 respectively. This also showed that

the higher displacement as pressure function makes the higher range in relative density.

Keywords: compaction, green density, numerical simulation, powder

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena berkat atas rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan mata kuliah Tugas Akhir serta menyusun laporan Tugas Akhir dengan judul: **“Simulasi Numerik Pengaruh Variasi Tekanan Terhadap Distribusi *Green density* Pada Kompaksi Serbuk Cu-10%Wtsn Dengan Metode Elemen Hingga”**. Laporan tugas akhir ini dibuat dengan tujuan untuk melengkapi Mata Kuliah Tugas Akhir yang menjadi salah satu syarat kelulusan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis menyadari bahwa tanpa adanya bantuan dari seluruh pihak, laporan ini tidak akan terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ini mengucapkan terimakasih terutama kepada Bapak Ibu dosen pembimbing yaitu Ibu Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si dan Bapak Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., PhD, yang telah bersedia meluangkan banyak waktu untuk membimbing penulis disela-sela kesibukan Beliau. Serta Ibu dosen penguji pada saat ujian sidang, yaitu Ibu Rindang Fajarin S.Si., M.Si dan Ibu Amaliya Rasyida, ST., M.Sc, yang telah banyak memberikan kritikan dan saran yang sangat membangun.

Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat kepada seluruh pihak yang membaca. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam menulis laporan tugas akhir ini, sehingga penulis menerima kritik dan saran yang dapat membangun serta memperbaiki kekurangan demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini.

Surabaya, 11 Juli 2017

Penulis,

Deshinta Ikasari
2713 100 046

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan.....	v
Abstrak	vii
<i>Abstract</i>	ix
Kata Pengantar	xi
Daftar Isi.....	xiii
Daftar Gambar.....	xv
Daftar Tabel.....	xix

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Metalurgi Serbuk	5
2.2 Kompaksi	5
2.2.1 Fundamental Kompaksi	7
2.2.2 Tujuan Akhir Kompaksi	10
2.3 Peluru <i>Frangible</i>	14
2.4 Densitas	17
2.5 Kompresibilitas	18
2.6 <i>Green Strength</i>	19
2.7 Distribusi Densitas Aksial.....	19
2.8 <i>2-D Volumetric Strain</i>	20
2.9 Model Drucker-Prager	22
2.10 Kriteria Yield Mohr-Coulomb	23
2.11 Grafik Properti Material	24
2.12 Metode Numerik	26
2.13 Metode Elemen Hingga	27
2.14 Penelitian Sebelumnya	29

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Diagram Alir	33
3.2	Spesifikasi Material Penelitian	34
3.2.1	Properti Material Penelitian	34
3.2.1.1	Material Serbuk	34
3.2.1.2	Material Cetakan	35
3.2.1.3	Material Pendorong	35
3.2.2	Geometri Penelitian	36
3.2.2.1	Geometri Cetakan	36
3.2.2.2	Geometri Pendorong	37
3.3	Peralatan Penelitian	37
3.4	Pemodelan dengan ANSYS 17.1	38
3.4.1	Penentuan <i>Element Type</i>	39
3.4.2	Penentuan <i>Material Properties</i>	39
3.4.3	<i>Meshing</i>	40
3.4.4	<i>Define Contact</i>	40
3.4.5	<i>Boundary Condition</i>	41
3.4.6	<i>Define Load</i>	41

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1	Hasil Simulasi Numerik <i>Displacement</i> terhadap Densitas Relatif Bulk	43
4.2	Hubungan <i>Displacement</i> terhadap Densitas Relatif Maksimum dan Minimum	47
4.3	Hubungan Regangan Aksial dan Radial terhadap Densitas Relatif	50
4.4	Hubungan Densitas Relatif terhadap Modulus Young...	52
4.5	Hubungan Densitas Relatif terhadap Kohesi	53
4.6	Prediksi Gaya Kompaksi terhadap <i>Displacement</i>	54

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	57

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema perilaku serbuk pada proses kompaksi.....	6
Gambar 2.2 Keseimbangan gaya sealama kompaksi	8
Gambar 2.3 Gradien tekanan	9
Gambar 2.4 Tekanan tengah dibagi tekanan yang diberikan vs parameter tekanan zuH/D	11
Gambar 2.5 Data untuk kompaksi serbuk Cu elektrolit	12
Gambar 2.6 Garis densitas konstan pada silinder padatan serbuk Cu	13
Gambar 2.7 Distribusi tekanan pada padatan siliner serbukCu	14
Gambar 2.8 Peluru <i>frangible</i>	15
Gambar 2.9 Hall <i>flowmeter</i>	17
Gambar 2.10 Kompresibilitas serbuk (s) <i>cohesive</i> (b) <i>noncohesif</i>	18
Gambar 2.11 Tegangan aksial sebagai fungsi jarak dari pendorong.....	20
Gambar 2.12 Deformasi normal elemen material.....	21
Gambar 2.13 Mohr-Coulomb <i>Failure Criterion</i>	24
Gambar 2.14 Hubungan relatif modulus elastisitas terhadap relative densitas pada specimen SS dan copper .	25
Gambar 2.15 Hubungan (a) kohesi dan (b) <i>internal friction</i> <i>angle</i> terhadap <i>relative density</i> pada spesimen iron dan <i>copper</i>	26
Gambar 2.16 Proses analisis metode elemen hingga	28
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	34
Gambar 3.2 Geometri cetakan (<i>die</i>)	36
Gambar 3.3 Geometri pendorong (<i>punch</i>)	37
Gambar 3.4 Diagram alir pemodelan	38
Gambar 3.5 Input untuk sifat material	39
Gambar 3.6 Hasil meshing geometri	40
Gambar 3.7 Hasil penerapan BC's	41
Gambar 4.1 Hubungan <i>displacement</i> terhadap densitas relatif bulk.....	44

Gambar 4.2 Visualisasi <i>displacement</i> pendorong (<i>punch</i>): (a) 0.02 m, (b) 0.03, (c) 0.04 m, (d) 0.05 m(e) 0.065 m	47
Gambar 4.3 Hubungan <i>displacement</i> terhadap densitas relatif maksimum	48
Gambar 4.4 Hubungan <i>displacement</i> terhadap densitas relatif minimum	49
Gambar 4.5 Hubungan <i>axial strain</i> terhadap densitas relatif ..	50
Gambar 4.6 Hubungan <i>radial strain</i> terhadap densitas relatif.	51
Gambar 4.7 Hubungan densitas relatif terhadap mod young ..	52
Gambar 4.8 Hubungan densitas relatif terhadap kohesi	54
Gambar 4.9 Hubungan <i>displacement</i> terhdap <i>force</i>	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik peluru <i>frangible</i>	16
Tabel 2.2 Sifat mekanik peluru <i>frangible</i> komposit Cu-Sn	17
Tabel 3.1 Parameter Drucker-Prager Serbuk Cu	35
Tabel 3.2 Sifat fisik ST60	35
Tabel 3.3 Sifat fisik ST90	35
Tabel 3.4 Dimensi geometri cetakan (<i>die</i>)	36
Tabel 3.5 Dimanasi geometri pendorong (<i>punch</i>)	37

(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kompaksi serbuk logam merupakan metode konvensional pemadatan serbuk untuk menghasilkan komponen *near/net-shaped*. Kompaksi bergantung pada sumber tekanan eksternal untuk mendeformasi serbuk menjadi padatan yang berdensitas tinggi, disamping memberikan kontrol bentuk dan dimensi pada serbuk (German, 1984). Kecenderungan industri untuk meningkatkan produktivitas adalah dengan meningkatkan sifat mekanik. Untuk memenuhi tren ini dapat dicapai dengan meningkatkan keseragaman densitas (Kwon, 2003). Distribusi *green density* yang tidak seragam merupakan permasalahan serius dalam kompaksi, karena hal ini dapat mengakibatkan *warpage* dan bahkan retakan selama proses eaksi. Selain itu heterogenitas dalam distribusi *green density* dapat berakibat pada peningkatan distorsi selama proses sintering. Persebaran densitas yang seragam adalah hasil yang diinginkan. Dengan perkembangan komputer, penerapan simulasi memberikan output yang realistis. Program optimasi metalurgi serbuk dikembangkan untuk menganalisis dan mengoptimasi kompaksi serbuk. Program optimasi memiliki keunggulan yaitu mampu memprediksi persebaran densitas padatan. Hal ini dikarenakan untuk menemukan nilai yang optimal apabila dilakukan dengan eksperimen tentu akan mahal dan memakan banyak waktu (Hwan-Chung, 2004).

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan oleh Stanley Selig pada tahun 2012, model elemen hingga dikembangkan untuk memprediksi distribusi densitas pada kompaksi serbuk Alumix 321. Model dapat memprediksi distribusi densitas hasil kompaksi *single-action* pada tekanan kompaksi dari 100 hingga 500 MPa. Suatu metode densitometri optik digunakan secara eksperimental dan didapatkan hasil yang sesuai dengan literatur maupun simulasi elemen hingga (Selig, 2012). Kemudian Kwon dkk, 1997 mempelajari perilaku densifikasi serbuk 316L stainless-steel pada



proses kompaksi. Penelitian ini juga mempelajari pengaruh gesekan antara serbuk dan dinding cetakan pada model kompaksi yang berbeda. Koefisien gesekan antara serbuk dan dinding cetakan ditentukan dari hubungan antara tekanan kompaksi dan tekanan ejeksi. Metode elemen hingga dibandingkan dengan data eksperimen untuk densifikasi dan deformasi serbuk 316L stainless-steel dibawah kompaksi *single* dan *double action*.

Selanjutnya pada penelitian ini akan dilakukan simulasi numerik pengaruh *displacement* sebagai fungsi tekanan terhadap distribusi *green density* pada proses kompaksi serbuk Cu-10%wtSn yakni pada aplikasi material peluru *frangible*. Densitas merupakan karakteristik paling penting dari padatan dalam proses metalurgi serbuk dan berhubungan dengan proses manufaktur. Hal tersebut perlu dikontrol dengan sangat baik untuk mencapai kualitas produk yang tinggi. Karena properti dan dimensi akhir dari produk sangat dipengaruhi oleh densitas padatan (Schlieper, 2000). Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Ansys Mechanical APDL 17.1 dengan metode elemen hingga. Simulasi dilakukan dengan memberikan variasi *displacement* sebagai fungsi tekanan yaitu sebesar 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.065 m. Hasil akhir yang diharapkan adalah untuk mendapatkan distribusi *green density* yang paling seragam.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi *displacement* sebagai fungsi tekanan terhadap nilai *bulk green density* pada kompaksi serbuk Cu-10%wtSn dengan menggunakan metode elemen hingga?
2. Bagaimana pengaruh variasi *displacement* sebagai fungsi tekanan terhadap distribusi *green density* pada kompaksi serbuk Cu-10%wtSn dengan menggunakan metode elemen hingga?



1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Distribusi campuran serbuk dianggap homogen
2. Dimensi serbuk homogen
3. Tidak ada unsur tambahan atau pengotor

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh variasi *displacement* sebagai fungsi tekanan terhadap nilai *bulk green density* pada kompaksi serbuk Cu-10% wtSn dengan menggunakan metode elemen hingga.
2. Menganalisis pengaruh variasi *displacement* sebagai fungsi tekanan terhadap distribusi *green density* pada kompaksi serbuk Cu-10% wtSn dengan menggunakan metode elemen hingga.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan penelitian ini diharapkan diperoleh informasi mengenai pengaruh variasi *displacement* sebagai fungsi dari tekanan terhadap persebaran *green density* pada hasil kompaksi serbuk. Sehingga akan memudahkan untuk memprediksi hasil akhir densitas pada proses selanjutnya.



(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Metalurgi Serbuk

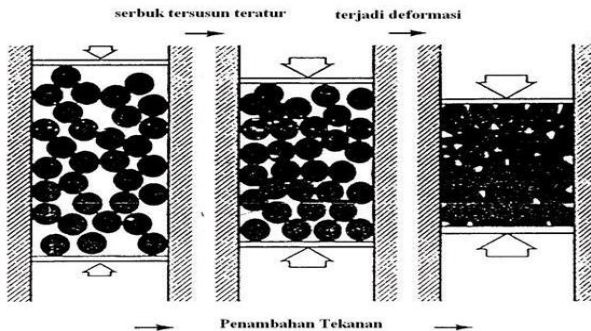
Metalurgi serbuk merupakan studi tentang pengolahan serbuk logam, termasuk di dalamnya terdapat tahapan fabrikasi, karakterisasi, dan konversi serbuk logam menjadi komponen yang berguna. Prinsip dalam pembentukan serbuk adalah memadatkan serbuk logam menjadi serbuk yang diinginkan kemudian memanaskannya di bawah temperatur lelehnya. Sehingga partikel-partikel logam memadu karena mekanisme transformasi massa akibat difusi atom antar permukaan partikel (Jones 1960). Serbuk didefinisikan sebagai partikel materi dengan ukuran kurang dari 1 mm. Karakteristik penting dari serbuk adalah rasio luas area dan volume yang relatif tinggi. Rangkaian proses metalurgi serbuk termasuk aplikasi dasar dari *heat*, *work*, dan deformasi serbuk. Proses tersebut mengubah bentuk, sifat dan struktur dari serbuk menjadi produk akhir. Pada metalurgi serbuk tradisional proses utama pembentukan komponen yakni kompaksi dan sintering. Sehingga dari rangkaian proses akan dihasilkan berbagai properti komponen. Kelebihan dari metalurgi serbuk adalah kemampuan untuk menghasilkan produk yang memiliki kualitas tinggi dan bentuk yang kompleks (German, 1984).

2.2 Kompaksi

Kompaksi merupakan suatu proses pembentukan atau pemampatan terhadap serbuk murni atau paduan atau campuran dari berbagai macam serbuk sehingga mempunyai bentuk tertentu dan mempunyai kekuatan yang cukup untuk mengalami proses selanjutnya yakni sintering. Kompaksi berkaitan erat dengan tekanan yang diberikan dari luar untuk mendeformasi serbuk menjadi massa yang memiliki densitas tinggi, selain memberikan bentuk dan mengontrol ukuran serbuk. Artinya tekanan yang diberikan pada serbuk, perilaku mekanik, dan laju penekanan merupakan parameter proses utama yang menentukan hasil



kepadatan serbuk. Peningkatan penekanan akan memberikan hasil *packing* yang lebih baik dan penurunan porositas. Ketika tekanan kompaksi dinaikkan, jumlah partikel yang mengalami deformasi plastis akan meningkat (Hewitt, 1974). Adanya kenaikan tekanan yang diberikan maka densitas serbuk akan meningkat tetapi porositas menurun (Abdoli, 2008). Pada tekanan rendah, aliran plastis dipusatkan pada kontak partikel. Ketika tekanan dinaikkan, aliran plastis yang homogen terjadi seluruhnya. Dengan penekanan yang cukup, seluruh partikel akan mengalami *work (strain hardening)* ketika jumlah porositas berkurang. (German, 1984)



Gambar 2.1 Skema perilaku serbuk pada proses kompaksi
(Sumber: German, 1984)

Berdasarkan Gambar 2.1 menunjukkan proses terjadinya kompaksi sebagai berikut:

1. Partikel-partikel serbuk yang menunjukkan pengaturan kembali (*rearrangement*) posisi partikel menjadi lebih rapat mengisi rongga antar partikel. Pergerakan dan pengaturan kembali partikel-partikel serbuk akibat adanya penekanan menyebabkan partikel serbuk tersusun lebih rata.
2. Terjadi deformasi elastis partikel. Umumnya deformasi elastis dapat dilihat dengan dimensi nantinya akan sedikit membesar saat dikeluarkan dari cetakan. Kecenderungan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



deformasi elastis meningkat dengan menurunnya nilai modulus elastisitas. (Khaidir, 2003)

3. Terjadi deformasi plastis partikel serbuk. Deformasi plastis terjadi pada bidang kontak antar partikel, selanjutnya aliran plastis akan menyebar ke seluruh bagian partikel.
4. Penghancuran partikel serbuk membentuk kepingan atau pecahan serbuk yang lebih halus. Fenomena ini terjadi pada serbuk yang getas. Batas antara tahap ini tidak jelas karena bisa terjadi secara bersamaan

Menurut Qureshi (2008), Hasil kompaksi akan mengakibatkan komposisi yang tidak homogen, yaitu adanya perbedaan distribusi densitas dan porositas yang disebabkan dengan adanya gesekan antar partikel dan adanya penyusutan selama terjadi deformasi pada produk. Adapun parameter yang mempengaruhi *cold die compaction* adalah ukuran partikel, porositas, *work hardening*, *internal friction*, dan efek distribusi serbuk selama kompaksi

Permasalahan utama dalam kompaksi serbuk adalah gesekan antara dinding cetakan dengan serbuk. Gesekan ini menyebabkan tekanan yang diberikan menurun dengan kedalaman padatan serbuk. Terdapat banyak unsur intrinsik serbuk yang mempengaruhi hubungan tekanan-densitas-kekuatan dalam padatan serbuk. Hal ini termasuk sifat material seperti kekerasan, laju *work (strain) hardening*, *surface friction*, dan ikatan kimia antar partikel. Faktor ekstrinsik berkaitan dengan ukuran serbuk, bentuk, pelumas, dan metode kompaksi. Pengaruh tekanan pada serbuk dikembangkan secara matematika untuk menunjukkan sumber dan besarnya pengaruh gesekan (Lammens, 1980).

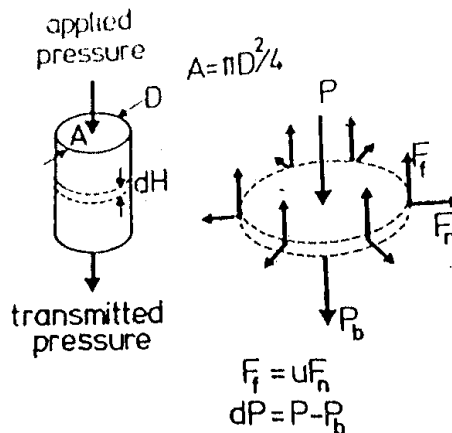
2.2.1 Fundamental Kompaksi

Kompaksi silinder dengan diameter D dan tinggi H seperti pada Gambar 2.2. Analisis bagian tipis tinggi dH dimana terdapat gaya tekan eksternal, menunjukkan bahwa tekanan pada bagian atas elemen P dan diteruskan melalui elemen bagian bawah P_b akan berbeda dengan gaya normal terhadap gesekan. Secara



matematika, keseimbangan gaya dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\Sigma F=0= A (P-P_o)+ uF_n \dots \dots \dots (2.1)$$



Gambar 2.2 Keseimbangan gaya selama kompaksi
(Sumber: German, 1984)

Dimana F_n adalah gaya normal, u adalah koefisien gesekan antara serbuk dengan dinding cetakan dan A adalah luas penampang. Gaya normal dapat diberikan dengan tekanan tertentu dengan konstanta proporsionalitas z . Faktor z mewakilkan rasio *radial stress* dan *axial stress*.

$$F_n = \pi z P D dH \dots \dots \dots (2.2)$$

Gaya gesekan F_f dihitung langsung dari gaya normal dan koefisien gesekan seperti,

$$F_f = u \pi z P D dH \dots \dots \dots (2.3)$$

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



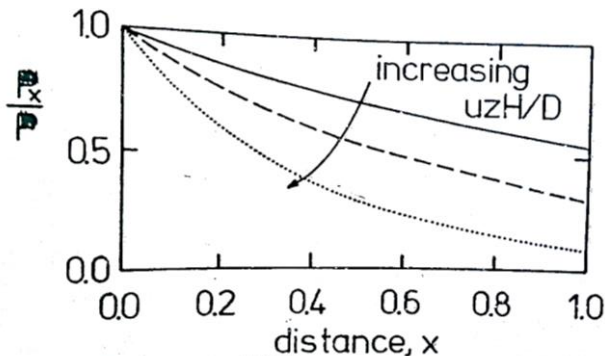
Dengan menggabungkan persamaan diatas memberikan perbedaan tekanan antara bagian atas dan bawah dari elemen serbuk dP sebagai

$$dP = P - P_b = -Fr/A = -4\mu z P dH/D \dots \dots \dots (2.4)$$

Penggabungan tekanan dengan ketinggian padatan menunjukkan bahwa tekanan pada posisi x dibawah punch diberikan dengan persamaan berikut:

$$P_x/P = \exp [-4\mu z x / D] \dots \dots \dots (2.5)$$

Persamaan tersebut tepat digunakan pada *single action pressing*. Hal tersebut menunjukkan bahwa tekanan menurun dengan kedalaman padatan serbuk saat kompaksi. Sebagai contoh plot pada Gambar 2.3, gradien tekanan dibawah *punch* atas pada *single pressing* seperti yang diberikan pada persamaan 2.5. Diagram tersebut memberikan tekanan pada posisi x dibawah *punch* atas sebagai rasio tekanan untuk beberapa kombinasi sampel $\mu z H/D$ mulai dari 0.15 hingga 0.60.



Gambar 2.3 Gradien tekanan
(Sumber: German, 1984)



Gesekan dinding berkontribusi untuk menurunkan tekanan dengan kedalaman. Untuk *single pressing* rata rata tegangan kompaksi diestimasi seperti,

$$\sigma = P (1 - 2uzH/D) \dots\dots\dots (2.6)$$

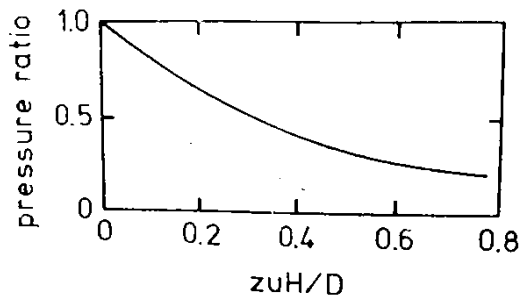
Tegangan rata-rata tergantung pada geometri (H/D), gesekan interpartikel (z) dan gesekan dinding cetakan (u). Tegangan rata-rata tinggi dicapai pada proses kompaksi singkat, dengan diameter besar dan pelumas dinding cetakan. Pelumas dalam kompaksi membantu mengurangi gaya gesekan. Pengaruh gesekan dinding cetakan adalah menurunkan efisien kompaksi. Akibatnya, padatan memiliki densitas yang tidak homogen, karena *green density* sangat tergantung pada tekanan yang diberikan. Dan juga ukuran dan bentuk padatan dapat mempengaruhi distribusi densitas.

2.2.2 Tujuan Akhir Kompaksi

Tujuan utama dalam kompaksi serbuk adalah untuk mendapatkan sifat padatan dengan minimal gesekan dinding. Dengan demikian, upaya dilakukan untuk mengurangi gaya aksial-radial untuk meminimalkan keausan cetakan dan meningkatkan efisiensi tekan. Rasio (H/D) penting untuk mendapatkan sifat padatan yang seragam. Umumnya ketika rasio (H/D) melebihi 5, kompaksi dianggap tidak berhasil. H padatan yang rendah memungkinkan keberhasilan penekanan satu arah. Rasio zuH/D merupakan *gauge* sensitif operasi penekanan. Parameter z merupakan rasio tegangan radial-aksial, u merupakan koefisien gesek dinding cetakan, H merupakan tinggi padatan dan D merupakan diameter padatan. Hasil penekanan terbaik diamati ketika rasio zuH/D kecil.

Gambar 2.4 menunjukkan bagaimana tekanan pusat berbeda dari tekanan yang diberikan untuk berbagai rasio zuH/D pada penekanan dua arah. Pelumas serbuk meningkatkan z sedangkan menurunkan u.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

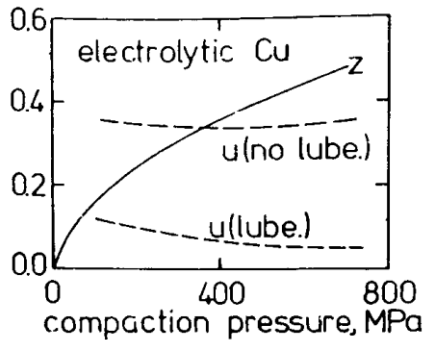


Gambar 2.4 Tekanan tengah dibagi tekanan yang diberikan vs parameter tekanan zuH/D (Sumber: German, 1984)

Eksperimen yang dilakukan Tabata dkk, 1981 mendemonstrasikan tiga hal penting yang mempengaruhi gesekan dinding cetakan, antara lain:

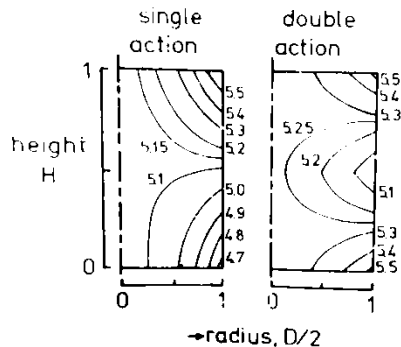
1. Pertama gesekan dinding cetakan u tergantung pada jumlah pelumas, semakin banyak pelumas semakin menurun gesekan.
2. Kedua, gesekan dinding cetakan menurun seiring dengan tekanan yang meningkat.
3. Ketiga, rasio tekanan z meningkat dengan akar kuadrat tekanan yang diberikan.

Gambar 2.5 plot beberapa data untuk serbuk tembaga elektrolit yang menunjukkan efek ini. Koefisien gesekan dinding cetakan u serta rasio tegangan radial/aksial z , versus tekanan kompaksi. Koefisien gesekan ditunjukkan dengan dan tanpa pelumas dinding cetakan. Pada tekanan kompaksi tinggi, pengaruh penurunan koefisien gesekan dan peningkatan rasio tegangan *offsetting* satu sama lain.



Gambar 2.5 Data untuk kompaksi serbuk Cu elektrolit (Sumber: Tabata dkk, 1981)

Pada kompaksi tekanan tinggi, berpengaruh menurunnya koefisien gesekan dan meningkatnya rasio tegangan. Pada kompaksi serbuk, gradien densitas dihasilkan dari gradien tekanan. Untuk serbuk tembaga, gradien densitas dengan penekanan satu ataupun dua arah ditunjukkan pada Gambar 2.6. Pada kedua padatan, rasio (H/D) sama, koefisien gesekan adalah 0.3 dan rasio tekanan 0.5. Pada penekanan satu arah, densitas terendah terjadi di padatan bagian bawah. Sedangkan pada penekanan dua arah memiliki densitas terendah di bagian paling pusat dari padatan.



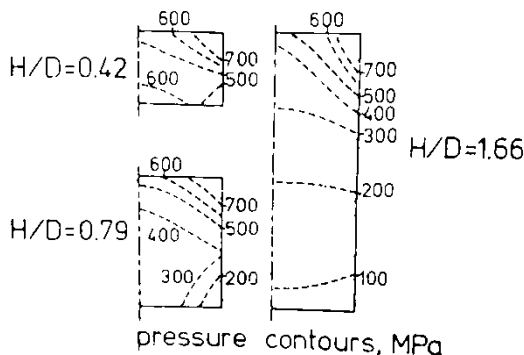
Gambar 2.6 Garis densitas konstan pada silinder padatan bubuk Cu (Sumber: German, 1984)

Mengingat bahwa kekuatan padatan didominasi oleh *green density*, mudah berspekulasi bahwa pola kekuatan dan kekerasan akan terlihat sangat mirip dengan profil densitas yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Faktor rasio tegangan kecil (z) diinginkan untuk keseragaman padatan. Ini berarti bahwa gesekan interpartikel tinggi akan membantu homogenitas dalam operasi menekan. Sayangnya, gesekan interpartikel tinggi menghambat kompaksi dengan mengharuskan tekanan jauh lebih besar. Maka pengaruh gesekan interpartikel tinggi adalah menurunkan densitas padatan keseluruhan sekaligus meningkatkan homogenitas. Faktor rasio tekanan terkait dengan karakteristik gesekan interpartikel umum. Saat ini belum ada analisis yang cermat untuk menciptakan hubungan antara *packing* atau aliran dan respon terhadap kompaksi.

Faktor penting lainnya adalah rasio (H/D). Ketika rasio (H/D) ditingkatkan, gradien densitas dalam padatan akan meningkat dan densitas padatan keseluruhan akan menurun. Gambar 2.7 menunjukkan hasil dari (Duwez dan Zell, 1949) untuk penekanan satu arah serbuk tembaga menggunakan tekanan kompaksi konstan 700 MPa.



Plot perkiraan distribusi tekanan dalam padatan diberikan untuk rasio (H/D) 0.42, 0.79, 1.66. Kenaikan rasio (H/D) menghasilkan gradien densitas yang lebih besar dan penurunan densitas bulk. Pada sintering, jumlah *shrinkage* padatan berbanding terbalik dengan *green density*; *green density* rendah menghasilkan *shrinkage* yang lebih besar. Pada banyak aplikasi P/M, *shrinkage* tidak diinginkan karena dapat masalah pada kontrol dimensi. Selanjutnya, keberadaan gradien *green density* dalam komponen merupakan masalah karena dimensi akan berubah tidak sistematis. Karena itu diinginkan bahwa minimal variasi *green density* untuk memastikan keseragaman pada kedua sifat dan dimensi setelah sintering.



Gambar 2.7 Distribusi tekanan pada padatan silinder serbuk Cu (Sumber: German, 1984)

2.3 Peluru *Frangible*

Pada aplikasi material *frangible* peluru, *frangibility* menentukan jumlah pecahan peluru setelah menghantam target yang keras. Rydlo (2010) menyatakan bahwa *frangibility* dipengaruhi oleh tiga faktor yaitu:

- 1) karakteristik proyektil,
- 2) karakteristik target, dan
- 3) kondisi impact.

Karakteristik proyektil dipengaruhi oleh sifat mekanik material, dimensi, dan bentuk proyektil. Semakin kecil sifat kekuatan dan ketangguhan proyektil maka *frangibility* akan semakin besar. Pada Gambar 2.8 ditampilkan karakteristik dari peluru *frangible*.



Gambar 2.8 Peluru *frangible*
(Sumber: Sweeney, 2010)

Secara umum densitas dari peluru *frangible* menurut Hansen (2008) harus memiliki densitas dengan kisaran $1,75 \text{ g/cm}^3$ – $8,25 \text{ g/cm}^3$. Sedangkan untuk peluru *frangible* yang sesuai dengan karakteristik uji tembak memiliki densitas dengan kisaran $7,1$ – $8,5 \text{ g/cm}^3$. Pada penelitian yang dilakukan oleh S. Kruachatturat dkk (2009) menyebutkan bahwa kekuatan tekan yang harus dimiliki oleh peluru *frangible* berada pada kisaran 31 – 310 MPa. Dengan nilai kekerasan permukaan pada kisaran 54 – 119 HV. Pada Tabel 2.1 ditampilkan data karakteristik peluru *frangible* produk dari *Sinterfire* dan SR. Berdasarkan kedua produk tersebut *trend* dari pengembangan peluru *frangible* saat ini adalah dengan menggunakan material komposit.



Tabel 2.1 Karakteristik peluru *frangible*
(Sumber: Rydlo, 2010)

Peluru <i>frangible</i>	Sinterfire	SR
Kaliber d (m)	0,009	0,009
Panjang peluru l_s (m)	0,0161	0,01435
Massa peluru m_s (kg)	0,00648	0,0055
Densitas peluru ρ_s (kg.m ⁻³)	7443	6763
Modulus elastisitas saat kompresi K_s (MPa)	10597	3999
Kompresi maksimal relatif $\epsilon_{xx,lim}$	0.01172	0.01255
Kecepatan batas $v_{s,lim}$ (m.s ⁻¹)	69.4	32.9
Energi kinetik batas $E_{ks,lim}$ (J)	15.6	2.9
Energi kinetik peluru pada jarak 2 m didepan mulut laras E_{k2} (J)	470.3	366.4
<i>Frangibility Factor FF</i>	30.1	126.3

Berdasarkan paten milik Joseph C. Benini, 2001, bahwa serbuk tembaga juga dipakai dalam peluru jenis ini. Benini membuat peluru dengan komposisi 89.75%wt serbuk Cu, 10%wt serbuk Sn, dan 0.25% *Zinc Stearate* sebagai pelumas dan ditekan dengan tekanan kompaksi sebesar 20 Ton. Dengan memvariasikan temperatur sintering pada kondisi lingkungan gas nitrogen dan ditahan pada temperatur tersebut selama 30 menit, peluru ini menghasilkan sifat mekanik seperti yang dijelaskan pada Tabel 2.2.



Tabel 2.2 Sifat Mekanik Peluru *Frangible* Komposit Cu-Sn
(Sumber: Benini, 2001)

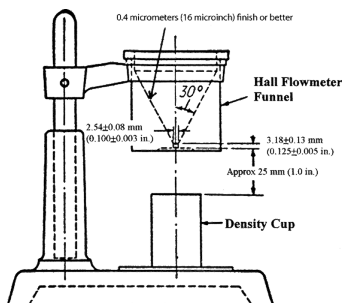
Temperatur Sintering (°C)	Densitas (g/cm ³)	Perubahan ukuran (%)	Nilai Kekerasan (HRH)	Transfer Rupture Strength (psi)
Tanpa sintering	7.26	0.14	73.7	3651
260	7.27	0.07	94.8	12710
810	6.53	2.53	52.7	32625

2.4 Densitas

Densitas relatif didefinisikan sebagai perbandingan densitas padatan (ρ_x) terhadap densitas logam tanpa porositas (ρ_s) (Heckel, 1962).

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_x}{\rho_s} \dots \dots \dots (2.7)$$

Densitas *apparent* serbuk merupakan massa per satuan unit volume pada saat serbuk dalam keadaan longgar (*loose*), tanpa mengalami agitasi (German, 1994). Densitas *apparent* ditentukan dengan flowmeter Hall seperti pada Gambar 2.9, dimana suatu wadah yang diketahui volumenya (25ml) diisi dengan mengalirkan serbuk logam melalui Hall *tunnel*.



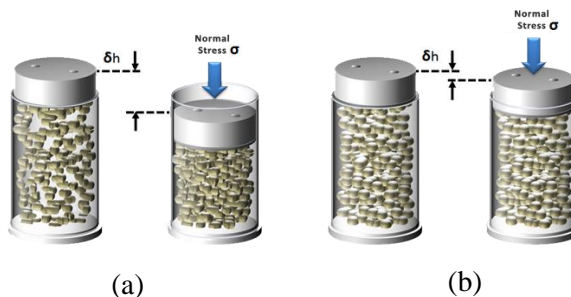
Gambar 2.9 Hall Flowmeter (Sumber: Upadyaya, 2002)



Seringkali massa dari powder dalam keadaan *loose* secara mekanik mengalami vibrasi atau ketukan (*tap*). Densitas dari "*loose powder*" meningkat karena perlakuan ini dan nilai densitasnya selalu lebih tinggi dari densitas *apparent*. Peningkatan densitas terbesar terjadi selama periode *tapping* awal dan akhirnya densitas menjadi konstan. Densitas yang stabil ini dikenal sebagai densitas *tap*. Jumlah kenaikan densitas karena ketukan (*tap*) tergantung pada tingkat gaya gesek antar partikel. Semakin besar gesekan pada serbuk (ukuran kecil, bentuk tidak beraturan, dan kekasaran permukaan), semakin besar pula peningkatan densitas karena ketukan (*tapping*) (Upadyaya, 2002).

2.5 Kompresibilitas

Kompresibilitas merupakan suatu ukuran dimana serbuk akan dikompres atau dipadatkan saat penerapan tekanan eksternal. Kompresibilitas memiliki satuan g/cm^3 , dibulatkan mendekati 0.01 g/cm^3 , pada tekanan kompaksi tertentu, atau sebagai tekanan yang diperlukan untuk mendapatkan densitas yang ditentukan. Kompresibilitas serbuk dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti: kekerasan, bentuk partikel, porositas internal, distribusi ukuran partikel, adanya nonmetal, penambahan elemen paduan atau pelumas padat (Upadyaya, 2002).



Gambar 2.10 Kompresibilitas serbuk (a) *cohesive*
(b) *noncohesive* (Sumber: freemantech.co.uk)



Kompresibilitas juga dapat didefinisikan sebagai persentase perubahan volume untuk tegangan normal yang diberikan. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10, serbuk yang memiliki nilai kohesi tinggi akan lebih mudah dipadatkan dibandingkan dengan serbuk non-kohesi (freemantech.co.uk).

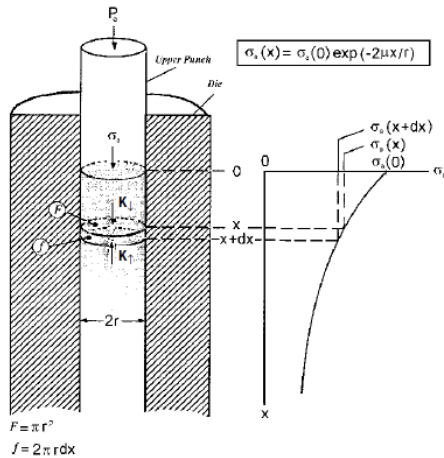
2.6 Green Strength

Kekuatan green (green strength) merupakan kekuatan mekanik dari green, yaitu padatan serbuk sebelum disinter. Karakteristik ini sangat penting, karena menentukan kemampuan dari padatan green untuk mempertahankan ukuran dan bentuk sebelum disinterring. Kekuatan green ini ditingkatkan dengan:

- Meningkatkan kekasaran permukaan partikel, karena lebih banyak site yang dapat mengalami *interlocking* mekanik.
- Meningkatkan luas permukaan serbuk. Hal ini dicapai dengan meningkatkan ketidak-beraturan dan pengurangan ukuran partikel.
- Menurunkan densitas *apparent*.
- Menurunkan oksidasi dan kontaminasi permukaan partikel.
- Meningkatkan *green density* (atau tekanan kompaksi).
- Menurunkan jumlah zat aditif (penambahan elemen paduan, karena dapat menghambat terjadinya *interlocking* mekanik) (Upadyaya, 2002).

2.7 Distribusi Densitas Aksial

Gaya gesekan pada dinding cetakan kompaksi menghalangi densifikasi serbuk karena bereaksi terhadap tekanan eksternal yang diberikan oleh pendorong (*punch*). Dengan meningkatnya jarak dari muka pendorong, tegangan aksial σ_a untuk densifikasi serbuk berkurang, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Tegangan aksial sebagai fungsi jarak dari pendorong (Sumber: Bockstiegel, 1967)

2.8 2-D Volumetric Strain

Volumetric Strain merupakan satuan perubahan volum, yaitu perubahan volum dibagi dengan volum aslinya.

Strain invariant,

$$I_1 = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} \dots \dots \dots (2.7)$$

$$I_2 = \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xy}^2 \dots \dots \dots (2.8)$$

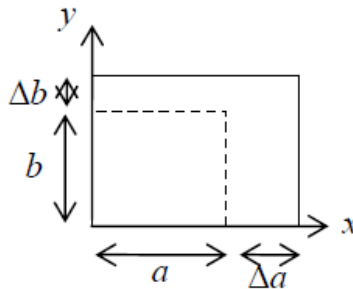
Berdasarkan deformasi elemen material pada persamaan (2.7) dan (2.8). *Volumetric strain* adalah

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V}{V} &= \frac{(a + \Delta a)(b + \Delta b) - ab}{ab} \\ &= (1 + \varepsilon_{xx}) + (1 + \varepsilon_{yy}) - 1 \end{aligned}$$

$$= \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} \dots \dots \dots (2.9)$$

Jika regangan kecil, bentuk $\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy}$ akan sangat lebih kecil daripada dua bentuk lainnya, dan *volumetric strain* pada kasus ini diberikan sebagai,

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} \dots \dots \dots (2.10)$$



Gambar 2.12 Deformasi normal elemen material
(Sumber: Kelly, 2013)

Karena persamaan diatas perubahan volume merupakan sebuah *invariant*, strain normal pada system koordinat manapun dapat digunakan dalam evaluasi. Perubahan volume tidak dapat bergantung pada sumbu tertentu yang kita pilih untuk mengukurnya. Pada Gambar 2.12 menampilkan grafik perubahan volum pada elemen 2 dimensi. Secara khusus, *principal strain* dapat digunakan:

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \dots \dots \dots (2.11)$$

Perhitungan di atas dilakukan untuk peregangan pada arah x dan y, namun hasilnya berlaku untuk deformasi sembarang (Kelly, 2013).



2.9 Model Drucker-Prager

Pada pengaplikasian kriteria yield Drucker-Prager permukaan yield tidak berubah seiring dengan peningkatan *yielding*, oleh karena itu tidak terdapat *hardening rule* dan material bersifat elastis-plastis sempurna. Tegangan ekuivalen untuk Drucker-Prager yaitu,

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2} \{s\}^T [M] \{s\} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana:

$$\sigma_m = \text{tegangan hidrostatik} = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$$

$\{s\}$ = tegangan deviatorik

β = konstanta material

Persamaan ini merupakan modifikasi dari kriteria yield von Mises dengan $\{\alpha\} = \{0\}$ yang menghitung pengaruh tegangan hidrostatik komponen: semakin tinggi tegangan hidrostatik maka semakin tinggi pula kekuatan yield. β merupakan konstanta material yang dijelaskan oleh persamaan berikut:

$$\beta = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana:

φ = sudut friksi internal

Sedangkan parameter material yield didefinisikan sebagai,

$$\sigma_y = \frac{6c \cos\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana:

c = nilai kohesi



Model klasik Drucker-Prager dapat diaplikasikan pada material granular (*friction*) seperti *soil*, *rock* dan *concrete*. Material model ini menggunakan pendekan hukum Mohr-Coulomb. Parameter input hanya terdiri dari tiga konstanta, yaitu:

- Nilai *cohesion* (>0)
- Sudut friksi internal
- Sudut dilatasi.

Jumlah dilatasi (kenaikan volum material yang disebabkan oleh *yielding*) dapat dikontrol melalui sudut dilatasi. Jika sudut dilatasi sama dengan sudut friksi, aturan aliran berhubungan. Namun jika sudut dilatasi sama dengan 0 (atau kurang dari sudut friksi) tidak ada peningkatan volum material ketika *yielding* dan aturan aliran tidak berhubungan.

Sebelum memasukkan parameter model Drucker-Prager, terlebih dahulu diperlukan input parameter sifat elastis yakni modulus elastisitas dan rasio poisson.

2.10 Kriteria Yield Mohr-Coulomb

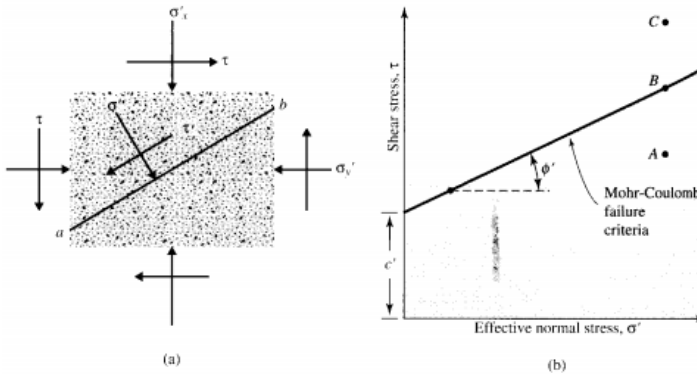
Partikel yang memiliki bentuk lebih tidak beraturan akan menghasilkan kohesi antartpartikel lebih tinggi, dimana hal ini berpengaruh pada sifat penggabungan serbuk. Selama tahapan deformasi plastis pada kompaksi serbuk, aliran partikel secara plastis sebagai hasil dari penerapan tekanan dan kohesi. Hal ini akan menghasilkan berkurangnya kekosongan (*void*) antartpartikel dan penggabungan ini akan meningkatkan kekakuan elastis dari serbuk. Kriteria yield Mohr-Coulomb didefinisikan sebagai,

$$\tau = C + \sigma \tan \varphi \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana τ merupakan *shear stress*, σ merupakan *normal stress* dan C dan φ adalah parameter Mohr. C adalah kohesi dari serbuk dan φ adalah *angle of internal friction*. Parameter ini berkaitan dengan parameter kriteria yield Drucker-Prager. Kohesi antara partikel serbuk logam cenderung rendah terutama pada awal proses kompaksi. Pada Gambar 2.13 menampilkan grafik ilustrasi



kriteria patahan Mohr-Coulomb, dimana ditentukan dari nilai kohesi dan *internal friction angle* (Marais, 1996).



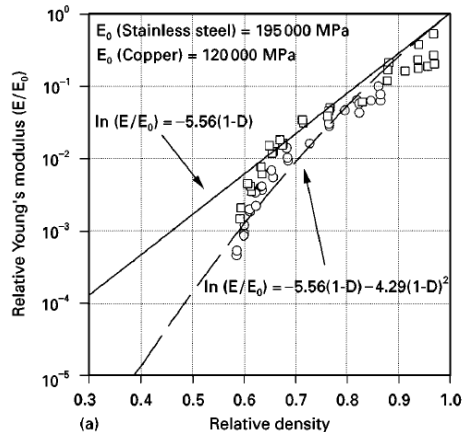
Gambar 2.13 *Mohr-Coulomb failure criterion*
(Sumber: Marais, 1996)

2.11 Grafik Properti Material

Pada pemodelan numerik kompaksi serbuk, terdapat beberapa parameter material, seperti kohesi, *internal friction angle*, dan modulus young dari serbuk, yang perlu untuk ditentukan melalui eksperimen sebagai fungsi dari densitas relatif. Fungsi nonlinier ini digabungkan ke dalam analisis inelastis model *finite element* untuk menetapkan parameter masukan model selama tahap pemadatan yang berbeda.

Modulus young merupakan salah satu parameter penting yang mempengaruhi *yielding* pada serbuk dibawah tegangan hidrostatis dan tegangan geser. Modulus elastisitas dapat ditentukan dengan eksperimen kompaksi serbuk dan menetapkan kurva tegangan-regangan pada tingkat kerapatan yang berbeda (Khoei, 2004). Pada penelitian ini eksperimen untuk mendapatkan properti young modulus dilakukan oleh Carnavas, 1998. Gambar 2.14 mengilustrasikan variasi modulus young terhadap densitas relatif pada serbuk copper dan stainless steel. Kurva ini didapatkan

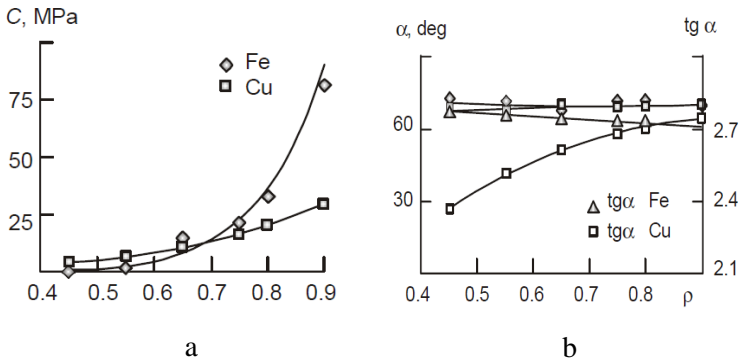
melalui eksperimen yang memanfaatkan proses *unloading* dan *reloading* serbuk.



Gambar 2.14 Hubungan relatif modulus elastisitas terhadap relatif densitas pada spesimen ○ SS dan □ Copper (Sumber: Carnavas, 1998)

Selama *unloading* springback elastis diukur, dan padatan serbuk yang sama digunakan dalam pemberian beban kembali (*reloading*) untuk mendapatkan hubungan antara modulus young dan bebas aksial (*axial load*). Hubungan antara modulus young dan densitas relatif kemudian ditetapkan untuk input data ke simulasi numerik (Khoei, 2004).

Parameter lain untuk menunjukkan perilaku serbuk pada simulasi kompaksi serbuk adalah sifat kohesi dan *internal friction angle*. Dalam proses kompaksi serbuk terdapat dua kriteria yang menentukan batas-batas plastis-elastis, yaitu terutama gaya geser dan hidrostatik. Namun, perilaku fisik setelah tegangan mencapai titik *yield* akan berbeda untuk kriteria ini. Dalam kompaksi serbuk, material akan terus berlanjut mengalami *yielding* (penurunan volum) hingga mencapai keadaan dimana terjadi fraktur partikel.



Gambar 2.15 Hubungan (a) kohesi dan (b) *internal friction angle* terhadap *relative density* pada spesimen iron dan copper (Sumber: E. Yu. Vyal, 2002)

Pada Gambar 2.15 parameter kohesi dan *internal friction angle* terhadap densitas relatif ditentukan melalui eksperimen yang dilakukan oleh E.Yu. Vyal, 2002 pada serbuk Cu dan Fe. Tetapi pada penelitian ini hanya akan diambil parameter untuk serbuk Cu. Dengan peningkatan kohesi densitas relatif meningkat untuk serbuk Cu. Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan kompresi padatan Cu meningkat dengan peningkatan densitas. Sedangkan *internal friction angle* pada serbuk Cu cenderung konstan pada angka 70° .

2.12 Metode Numerik

Terdapat banyak masalah dalam praktik keteknikan yang tidak dapat mencapai solusi yang tepat. Ketidakmampuan ini mungkin disebabkan karena persamaan yang rumit yang muncul dari syarat batas dan awal. Untuk menyelesaikan masalah seperti ini dapat menggunakan perkiraan numerik. Berkebalikan dengan solusi analitis, yang menampilkan perilaku tepat dari suatu sistem

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



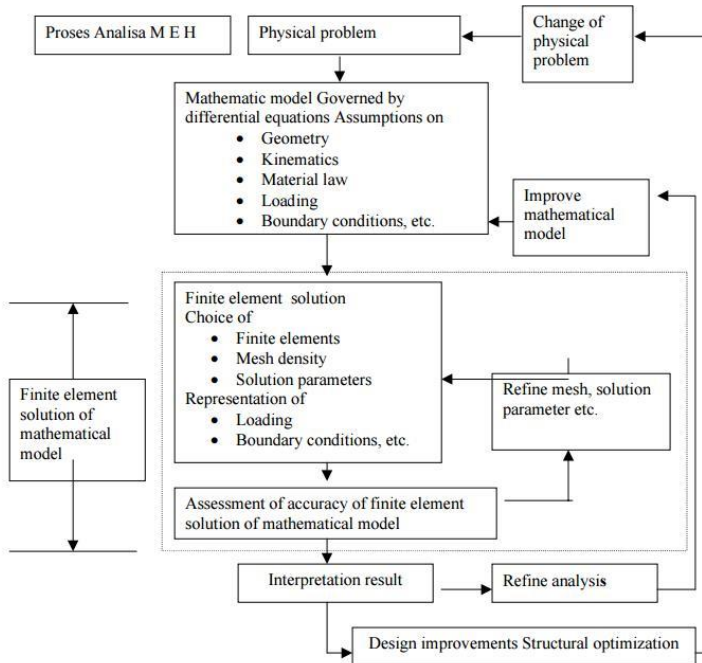
pada setiap titik dalam sistem, solusi numerik memperkirakan solusi tepat hanya pada titik diskret, yang disebut nodes. Langkah awal dari setiap prosedur numerik disebut diskritisasi. Proses diskritisasi membagi obyek menjadi sejumlah subregional dan nodes. Terdapat dua jenis umum dari metode numerik, yaitu (1) *finite different methods* dan (2) *finite element methods*. Pada *finite different methods*, persamaan diferensial ditulis untuk setiap node, dan turunannya digantikan oleh *difference equations*. Pendekatan ini menghasilkan satu set persamaan simultan. Meskipun *finite difference method* mudah untuk dipahami dan memakai masalah sederhana, mereka menjadi sulit untuk mengaplikasikan masalah dengan geometri kompleks atau syarat batas yang kompleks. Keadaan ini juga benar untuk permasalahan dengan sifat material non-isotropik. Sebaliknya, *finite element method* menggunakan *integral formulation* daripada *difference equation* untuk menciptakan system persamaan aljabar. Bahkan, suatu perkiraan fungsi kontinu diasumsikan untuk mewakili solusi setiap elemen. Solusi lengkap kemudian dihasilkan dengan menggabungkan solusi individu, memungkinkan untuk kontinuitas pada syarat inter-elemen (Moaveni, 1999).

2.13 Metode Elemen Hingga

Teknik analisis elemen hingga merupakan salah satu jenis prosedur numerikal, dimana akurasi perlu untuk dinilai. Jika akurasi tidak sesuai dengan kriteria, maka solusi numerikal tersebut harus diulang dengan parameter yang lebih halus (seperti, bentuk *mesh* yang halus) hingga akurasi dianggap cukup sesuai dengan prosedur metode elemen hingga yang ditunjukkan oleh model matematika tertentu dan semua asumsi yang digunakan akan berpengaruh terhadap respon dihasilkan. Kita tidak dapat mengharap informasi lain dari fenomena fisik yang diprediksi selain informasi yang terkandung dalam model matematikanya. Sehingga pemilihan model matematika yang tepat sangatlah penting karena dapat menjelaskan dengan tepat sesuai dengan



kenyataan di lapangan. Pada Gambar 2.16 ditampilkan ilustrasi tahapan dalam analisa elemen hingga (Bathe, 1996).



Gambar 2.16 Proses Analisis Metode Elemen Hingga
(Sumber: Bathe, 1996)

Langkah-langkah dasar yang terlibat dalam analisis elemen hingga terdiri dari hal-hal berikut:

a. Tahap *Preprocessing*

1. Membuat dan mendiskritkan domain solusi menjadi elemen hingga; yaitu dengan membagi masalah menjadi node dan elemen.



2. Mengasumsikan fungsi bentuk untuk mewakili perilaku fisik suatu elemen; artinya, perkiraan fungsi kontinu diasumsikan mewakili solusi suatu elemen
3. Mengembangkan persamaan untuk sebuah elemen
4. Menyusun elemen untuk menampilkan keseluruhan masalah. Membangun matriks kekakuan global.
5. Menerapkan *boundary condition*, *initial condition*, dan *loading*.
- b. Tahap *Solution*
 6. Memecahkan satu set persamaan aljabar linear atau nonlinier secara simultan untuk mendapatkan hasil nodal.
- c. Tahap *Postprocessing*
 7. Mendapatkan berbagai informasi penting

Pada umumnya, terdapat beberapa pendekatan untuk memformulasikan masalah elemen hingga: (1) *Direct Formulation*, (2) *The minimum total potential energy formulation*, dan (3) *Weighted Residual Formulations* (Moaveni, 1999).

2.14 Penelitian Sebelumnya

Pada penelitian sebelumnya dalam papernya menggunakan Shima dan Oyane Model untuk simulasi kompaksi dan mengusulkan sebuah metode sederhana untuk menentukan parameter material untuk model Shima dan Oyane. Simulasi numerik distribusi densitas dan *tool force* untuk eksperimen yang sama dengan PM MODNET diverifikasi dengan membandingkannya dengan data eksperimen. Selain itu, sebuah konsep baru pada pembentukan retak selama kompaksi diusulkan untuk memprediksi pembentukan retak. Parameter proses yang dioptimalkan untuk mendapatkan distribusi kepadatan yang seragam dengan menggunakan alat optimasi, PMSolver (Kwon, 2003).

Selanjutnya Hwan Chung, 2004 meneliti bahwa distorsi sintering ditentukan menggunakan simulasi elemen hingga dengan



inputan distribusi *green density* dan prediksi geometri setelah kompaksi. Dengan software CAE (PMSolver/Compaction 3D). Parameter material untuk memprediksi perilaku densifikasi dengan tepat selama kompaksi berdasarkan model Shima dan Oyane. Kemudian PMSolver diverifikasi dengan membandingkan prediksi distribusi densitas dengan hasil eksperimen dan dengan perhitungan menggunakan ABAQUS/eksplisit.

Dengan teori Mohr-Coulomb dan model *elliptical surface plasticity*, Crici G, 2016 mengembangkan dan mengimplementasikan dalam ANSYS elemen hingga dengan menggunakan USERMAT. Beberapa simulasi ditampilkan untuk memvalidasi model serbuk logam. Analisis perilaku serbuk logam selama kompaksi berdasar perbedaan koefisien gesekan.

Khoei pada tahun 1998 melakukan simulasi dengan analisis dinamis transien dari proses pemadatan bubuk yang disimulasikan dengan metode elemen hingga *large displacement* berdasarkan formulasi Lagrangian total dan *updated*. Kombinasi antara model mohr coulomb dan elliptical cap diterapkan untuk menggambarkan perilaku serbuk secara konstitutif. Sebuah hukum *friction coulomb* dan teori plastisitas gesekan dalam konteks dari formulasi elemen antarmuka digunakan dalam model konstitutif perilaku *frictional* antara serbuk dan cetakan. Elemen formulasi digunakan dalam pemodelan konstitutif perilaku gesekan dari die and powder. Selanjutnya, perilaku bubuk selama pemadatan komponen *plain bush*, *rotational flange* dan *shaped tip* dianalisis secara numerik. Hal ini menunjukkan bahwa formulasi *updated lagrangian*, dengan menggunakan kombinasi model *mohr coulomb* dan *elliptical cap* berhasil secara efektif untuk mensimulasi kompaksi serbuk logam.

Pada tahun selanjutnya Khoei kembali mensimulasikan proses pemadatan serbuk dengan menggunakan model plastisitas tiga dimensi. Model *cone-cap density-dependent plasticity* dikembangkan berdasarkan kombinasi *convex yield surface* yang terdiri dari *failure envelope* dan *hardening elliptical cap* untuk perilaku nonlinier material serbuk dalam konsep formulasi

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



plastisitas umum. Algoritma umum untuk *cap plasticity* dari sudut pandang pemodelan numerik yang efisien disajikan. *Plastisitas cap* dilakukan dalam kerangka deformasi elemen hingga yang besar, untuk memprediksi distribusi densitas relatif tidak seragam selama pemadatan serbuk.



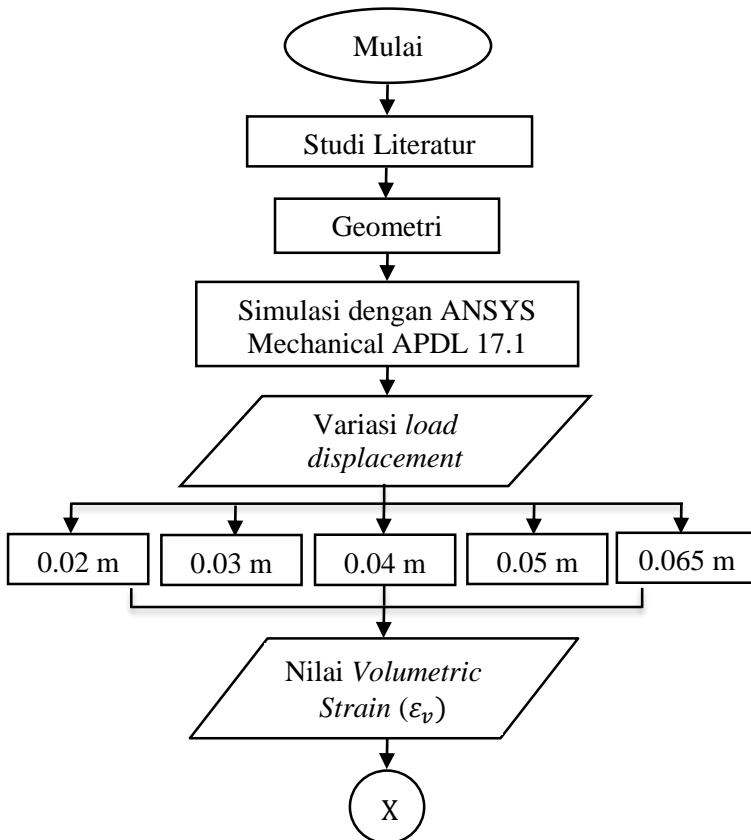
(halaman ini sengaja dikosongkan)

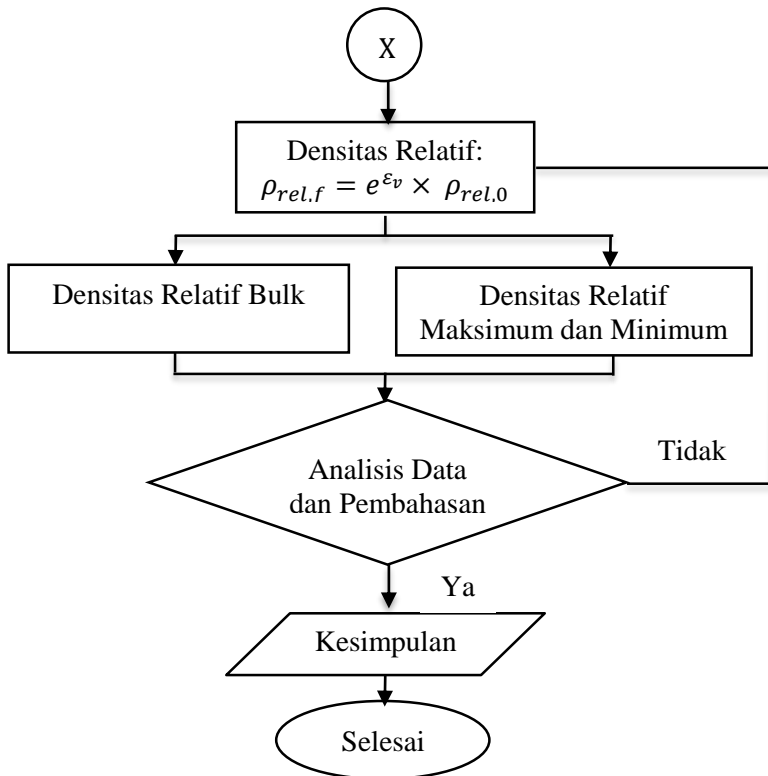


BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Diagram alir dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:





Gambar 3.1 diagram alir penelitian

3.2 Spesifikasi Material Penelitian

3.2.1 Properti Material Penelitian

3.2.1.1 Material Serbuk

Pada penelitian ini material serbuk yang digunakan adalah serbuk Cu sebagai matriks dan serbuk Sn sebagai pengikat dengan fraksi volum pengikat 10%. Akan tetapi pada penelitian ini serbuk Cu-10%wtSn diasumsikan sebagai serbuk Cu. Maka properti yang digunakan adalah properti untuk serbuk Cu. Berikut merupakan properti fisik dari serbuk ditunjukkan pada Tabel 3.1:



Tabel 3.1 Parameter Drucker-Prager Serbuk Cu
Sumber: [1] Carnavan, 1998; [2] Y.Val, 2002

Sifat	Nilai
<i>Cohesion</i> ^[1]	5.4×10^6 Pa
<i>Angle of internal friction</i> ^[1]	70°
<i>Angle of dilatancy</i> ^[1]	70°
Modulus elastisitas ^[2]	123.8×10^6 Pa
Rasio poisson ^[2]	0.246

3.2.1.2 Material Cetakan

Material cetakan (*die*) yang digunakan dalam penekitian ini adalah baja ST60. Berikut merupakan sifat fisik dari baja ST60 ditunjukkan pada Tabel 3.2:

Tabel 3.2 Sifat Fisik ST60
(Sumber: azom.com)

Sifat	Nilai
Densitas	7870 kg/m ³
Modulus elastisitas	200×10^9 Pa
Rasio poisson	0.29

3.2.1.3 Material Pendorong

Material pendorong (*punch*) yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja ST90. Berikut merupakan sifat fisik dari baja ST90 ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Sifat Fisik ST90
(Sumber: azom.com)

Sifat	Nilai
Densitas	7850 kg/m ³
Modulus elastisitas	200×10^9 Pa
Rasio poisson	0.29



3.2.2 Geometri Penelitian

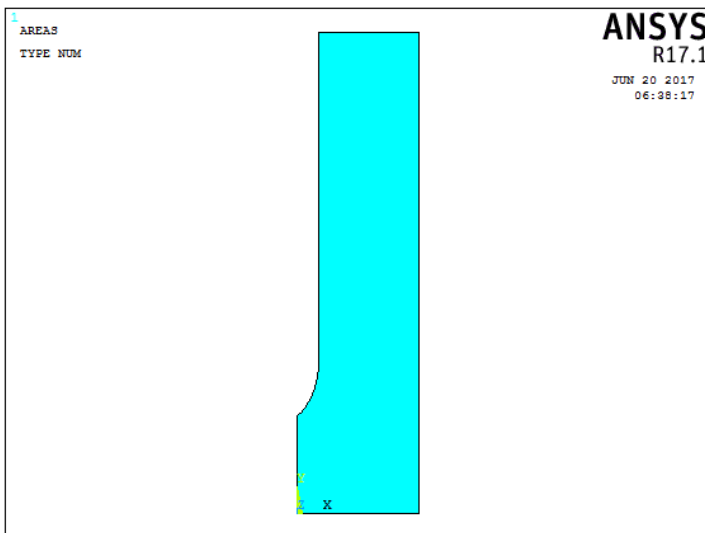
Geometri yang digunakan pada penelitian ini berupa silinder, baik untuk cetakan maupun pendorong. Geometri serta dimensi untuk penelitian ini mengacu pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Firmansyah, 2014.

3.2.2.1 Geometri Cetakan (*die*)

Cetakan digunakan untuk membentuk serbuk sehingga menjadi padatan. Berikut merupakan dimensi serta gambar geometri dari cetakan ditunjukkan pada Tabel 3.4 dan Gambar 3.2:

Tabel 3.4 Dimensi Geometri Cetakan (*Die*)

	Dimensi (m)
Jari-jari Luar Silinder	2.54×10^{-2}
Jari-jari Lubang Dalam Silinder	4.5×10^{-3}
Tinggi Cetakan Peluru	1.5×10^{-2}
Tinggi Total	9.5×10^{-2}



Gambar 3.2 Geometri cetakan (*die*)

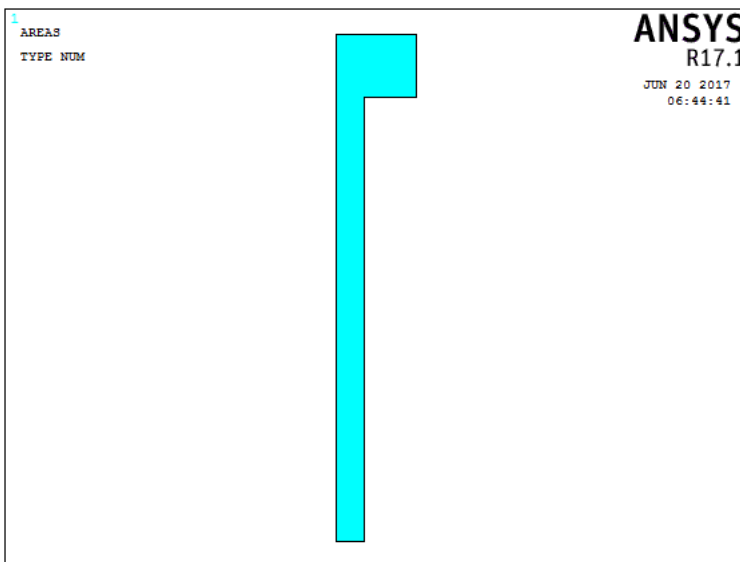


3.2.2.2 Geometri Pendorong (*punch*)

Pendorong difungsikan untuk menekan atau mendorong serbuk hingga menjadi padatan. Berikut merupakan dimensi serta gambar geometri dari pendorong ditunjukkan pada Table 3.5 dan Gambar 3.3:

Tabel 3.5 Dimensi Geometri Pendorong (*Punch*)

	Dimensi (m)
Jari-jari Atas	1.27×10^{-2}
Jari-jari Bawah	4.45×10^{-3}
Tinggi Kepala	1×10^{-2}
Tinggi Total	8×10^{-2}



Gambar 3.3 Geometri pendorong (*punch*)

3.3 Peralatan Penelitian

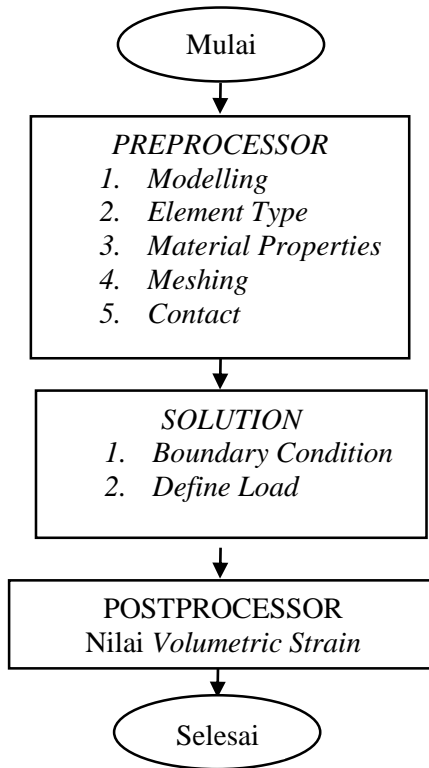
Peralatan yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah software ANSYS 17.1 *Mechanical* APDL, yang



merupakan *software* yang digunakan untuk memodelkan simulasi dengan metode elemen.

3.4 Pemodelan dengan ANSYS 17.1

Diagram alir dari pemodelan kompaksi serbuk dengan menggunakan ANSYS Mechanical APDL 17.1 dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram alir pemodelan

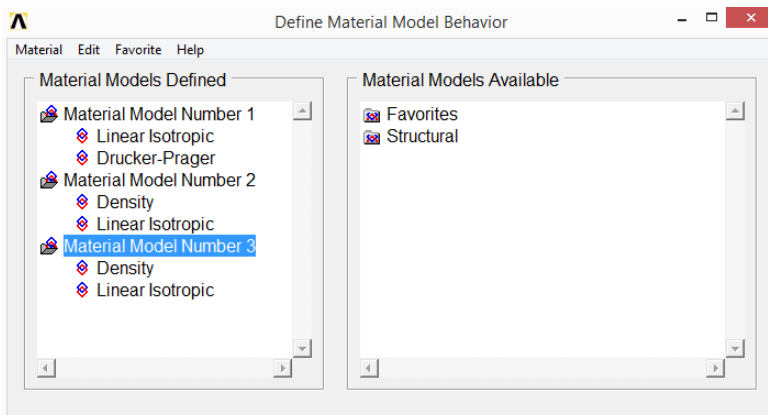


3.4.1 Penentuan *Element Type*

Element type yang digunakan pada penelitian ini adalah *PLANE183*. Dimana tipe elemen ini sesuai untuk memodelkan geometri 2D dan *meshing* secara tidak beraturan. Elemen ini memiliki dua *degree of freedom* pada setiap *nodenya* yakni translasi *nodal* arah x dan y. Selain itu elemen tipe ini cocok untuk memodelkan elemen *axisymmetric*, dimana model tersebut akan digunakan pada penelitian ini. Serta tipe elemen *Plane183* memiliki kemampuan analisis untuk masalah *large deflection* dan *large strain*.

3.4.2 Penentuan *Material Properties*

Pada penelitian ini terdapat 3 komponen yang memiliki properti yang berbeda. Yang pertama adalah serbuk, menggunakan model material Drucker Prager dimana terdapa lima jenis input properti material, yaitu modulus young, prasio poisson, *cohesion*, *angle of internal friction*, dan *angle of dilatancy*. Selanjutnya untuk cetakan dan pendorong input material berupa modulus young, rasio poisson, dan densitas. Input properti material pada *software* dapat dilihat pada Gambar 3.5.

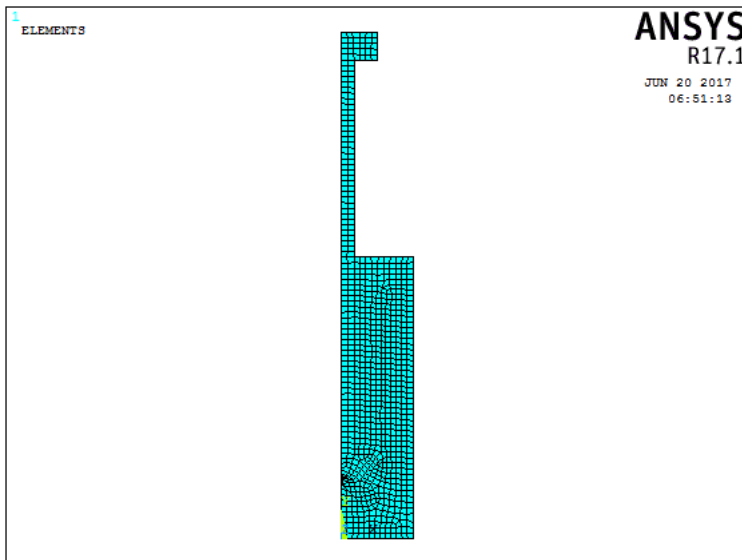


Gambar 3.5 Input untuk sifat material



3.4.3 Meshing

Metode *meshing* yang digunakan pada ketiga geometri (serbuk, cetakan dan pendorong) adalah *free meshing*. Elemen yang digunakan berupa *quadrilateral* untuk aplikasi 2D dengan ukuran menggunakan pengaturan *smart size 2*. Hasil meshing dari serbuk, cetakan dan pendorong ditunjukkan oleh Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Hasil meshing geometri

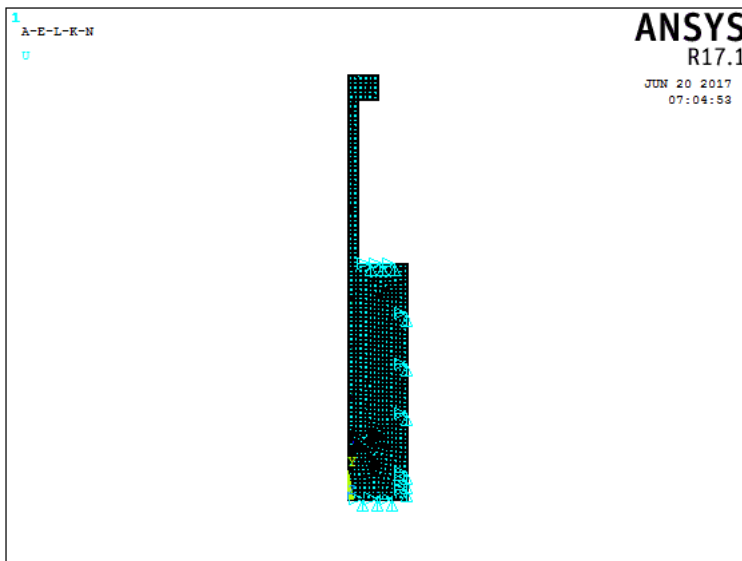
3.4.4 Define Contact

Pada saat proses kompaksi akan terjadi kontak antara pendorong dengan serbuk dan kontak antara serbuk dengan cetakan. Pada penelitian ini digunakan tipe kontak *surface to surface*, dengan jenis kontak algoritma *lagrange multiplier on contact normal and penalty on tangen*. Sedangkan untuk perilaku kontak digunakan tipe standar.



3.4.5 Boundary Condition

Untuk memodelkan proses kompaksi pada cetakan silinder digunakan metode *axysimmetric* pada pusat sumbu y. Serta *constraint* dilakukan pada bagian bawah, sisi dan atas dari cetakan, sedangkan pendorong ditahan terhadap arah radial tetapi bebas bergerak ke arah aksial. Hasil penerapan *boundary condition* dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Hasil penerapan BC's

3.4.6 Define Load

Dalam penelitian ini, *load* yang diberikan berupa *displacement* yang diterapkan pada bagian atas dari pendorong. Diberikan *load* pada kedalaman 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.065 m.



(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Dalam rangka untuk memodelkan proses kompaksi serbuk pada sebuah komponen peluru dilakukan analisis secara numerik. Permasalahan ini diselesaikan melalui kontrol *displacement* dengan meningkatkan pergerakan pendorong (*punch*) dan memprediksi gaya (*force*) kompaksi pada *displacement* yang berbeda. Perhitungan elemen hingga dilakukan dengan software ANSYS Mechanical APDL 17.1.

4.1 Hasil Simulasi Numerik *Displacement* terhadap Densitas Relatif Bulk

Pada penelitian ini variasi *displacement* digunakan sebagai fungsi tekanan. Menurut hukum Hooke yang menyatakan bahwa $F = \Delta \times k$, yang mana berarti semakin besar *displacement* maka semakin besar gaya (*force*). *Displacement* disini merupakan perpindahan dari pendorong (*punch*) ketika tekanan diberikan pada permukaan atas pendorong. Berdasarkan persamaan tekanan $P = F/A$, pada peningkatan gaya (*force*) tekanan juga akan meningkat. Dari hubungan dua persamaan ini dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai *displacement* semakin besar pula nilai tekanan.

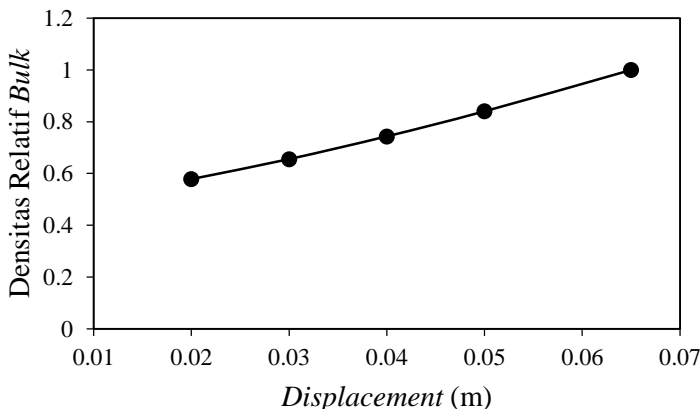
Hasil densitas pada proses kompaksi, yang selanjutnya disebut dengan *green density*, merupakan faktor terpenting dari serangkaian proses metalurgi serbuk. Hal ini dikarenakan pada proses kompaksi akan diperoleh peningkatan densitas yang besar dari densitas serbuk mula-mula (*apparent density*), selain itu dapat diketahui kualitas dari suatu padatan, ada atau tidaknya indikasi retak. Pada penelitian ini akan dihitung densitas relatif sebagai fungsi dari *green density*. Densitas relatif didefinisikan sebagai rasio densitas pada kepadatan tertentu terhadap densitas logam. Sedangkan *green density* merupakan densitas hasil kompaksi yang menghasilkan kepadatan/densitas tertentu yang



bergantung pada beberapa faktor, salah satunya *displacement* sebagai fungsi dari tekanan.

Seperti yang telah disebutkan pada metodologi penelitian, selanjutnya untuk mendapatkan nilai densitas relatif ANSYS menghitung dan menghasilkan nilai *strain* arah x, *strain* arah y, *strain* arah z pada setiap node. Setelah itu dilakukan perhitungan *volumetric strain* melalui persamaan $\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$. Kemudian untuk mendapatkan nilai densitas relatif menggunakan persamaan yang diturunkan oleh Coube dan Riedel (2000), yaitu (*volumetric strain* = $\ln \frac{\rho_{rel,f}}{\rho_{rel,0}}$). Dimana eksponen jumlah strain tersebut dikalikan dengan densitas relatif awal ($\rho_{rel,f} = e^{\varepsilon_v} \times \rho_{rel,0}$). Pada penelitian ini digunakan densitas relatif awal ($\rho_{rel,0} = 0.449$), sehingga didapatkan nilai densitas relatif akhir (*final*) pada setiap variasi *displacement*.

Pada Gambar 4.1 menunjukkan hasil dari perhitungan densitas relatif bulk pada tahapan *displacement* yang berbeda. Dimana densitas relatif *bulk* didefinisikan sebagai densitas relatif secara keseluruhan dari komponen padatan.



Gambar 4.1 Hubungan *displacement* terhadap densitas relatif *bulk*

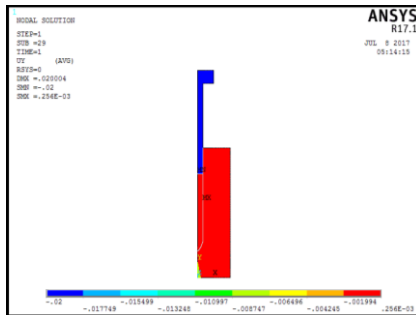


Berdasarkan teori yang dikemukakan oleh (German, 1994), bahwa kompaksi tergantung pada sumber tekanan eksternal untuk mengubah bentuk serbuk menjadi suatu bentuk komponen yang memiliki densitas tinggi. Dapat dilihat pada Gambar 4.1, bahwa semakin meningkatnya nilai *displacement* semakin tinggi nilai densitas relatif. Dimana densitas relatif merupakan rasio antara densitas suatu serbuk pada kepadatan tertentu (ρ_x) dengan densitas logam tanpa porositas (ρ_s). Hal ini dapat dilihat pada persamaan 2.7, nilai suatu densitas pada kepadatan tertentu (ρ_x) berbanding lurus dengan nilai densitas logam (ρ_s). Dari persamaan dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi suatu nilai densitas relatif, maka semakin tinggi pula nilai densitas pada kepadatan tertentu (ρ_x). Pada Gambar 4.1 dapat dilihat pada *displacement* 0.02 m didapatkan nilai densitas relatif sebesar 0.58, *displacement* 0.03 m didapatkan nilai densitas sebesar 0.66, *displacement* 0.04 m didapatkan nilai densitas sebesar 0.74, *displacement* 0.05 m didapatkan nilai densitas sebesar 0.84, sedangkan pada *displacement* 0.065 m menghasilkan densitas relatif sebesar 1. Meskipun pada *displacement* 0.065 dengan densitas relatif sebesar 1 tidak mungkin dicapai pada *green density*, akan tetapi secara grafik telah sesuai dengan teori yang dikemukakan diatas.

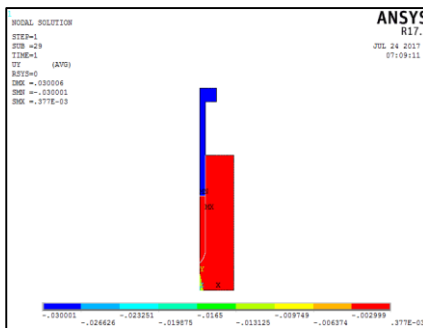
Pada Gambar 4.2 menunjukkan visualisasi perpindahan pendorong yang menekan serbuk pada nilai perpindahan (*displacement*) secara aksial arah negatif sebesar (a) 0.02 m, (b) 0.03 m, (c) 0.04 m, (d) 0.05 m dan (e) 0.065 m.



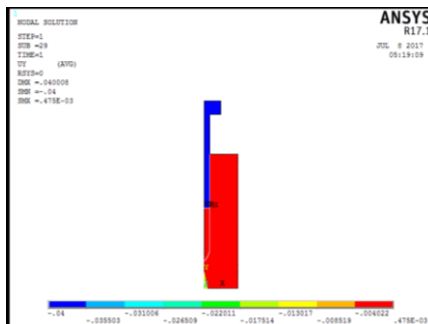
(a)

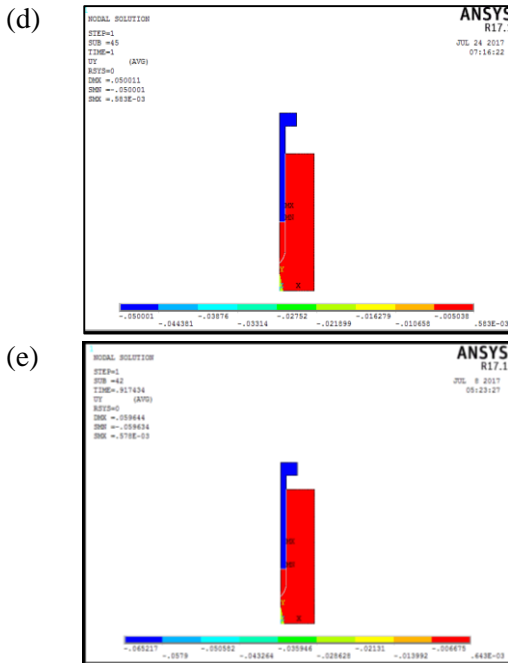


(b)



(c)





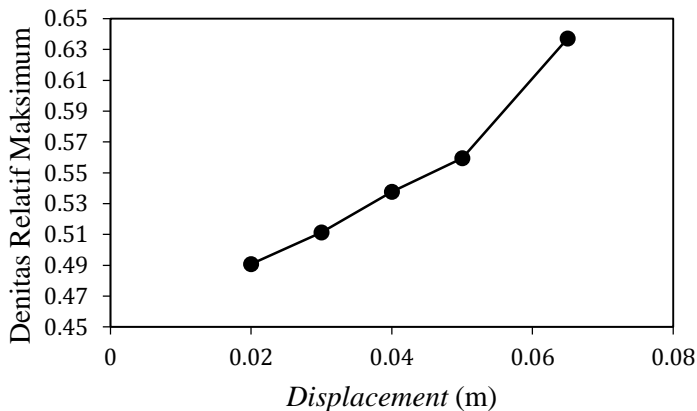
Gambar 4.2 Visualisasi *displacement* pendorong (*punch*):
(a) 0.02 m, (b) 0.03 m, (c) 0.04 m, (d) 0.05 m (e) 0.065 m

4.2 Hubungan *Displacement* terhadap Densitas Relatif Maksimum dan Relatif Densitas Minimum

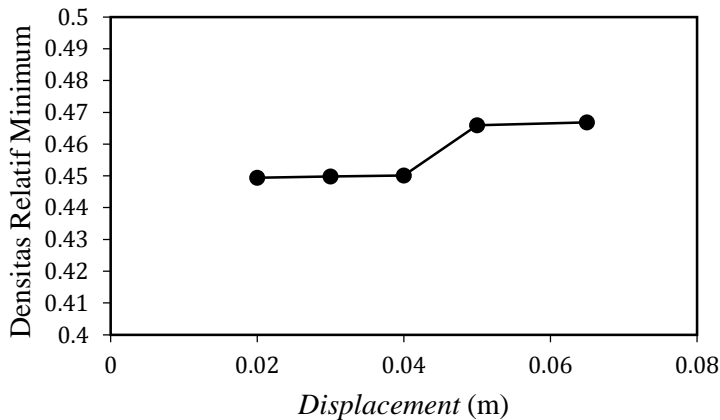
Persebaran densitas relatif pada suatu padatan salah satunya dapat ditentukan melalui perbedaan antara densitas relatif maksimum (tertinggi) dan densitas relatif minimum (terendah) dari suatu padatan. Semakin kecil nilai perbedaan antara densitas relatif tertinggi dan terendah menunjukkan semakin seragam persebaran densitas relatif pada suatu padatan. Sebaliknya apabila perbedaan nilai antara densitas relatif tertinggi dan terendah maka semakin tidak seragam persebaran densitas relatif pada suatu padatan.



Pada penelitian ini, *software* Ansys menghitung *strain* arah x, *strain* arah y, *strain* arah z pada setiap node, kemudian dihitung dalam bentuk elemen. Setelah itu nilai dikonversikan dalam densitas relatif. Pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 menunjukkan hubungan antara densitas relatif maksimal dan minimal terhadap *displacement*. Dapat dilihat dari grafik pada *displacement* 0.02 m, elemen mempunyai relatif densitas tertinggi yaitu 0.4908, dan densitas relatif elemen terendah adalah sebesar 0.4494. Pada *displacement* 0.03 m, elemen mempunyai densitas relatif tertinggi sebesar 0.5113, dan densitas relatif terendah sebesar 0.4498. Pada *displacement* 0.04 m, elemen mempunyai densitas relatif tertinggi sebesar 0.5376, dan densitas relatif terendah sebesar 0.4505. Pada *displacement* 0.05 m, elemen mempunyai densitas relatif tertinggi sebesar 0.5595, dan densitas relatif terendah sebesar 0.4696. Sedangkan pada *displacement* 0.065 m, elemen memiliki densitas relatif tertinggi sebesar 0.6372, dan densitas relatif terendah adalah sebesar 0.4669.



Gambar 4.3 Hubungan *displacement* terhadap densitas relatif maksimum



Gambar 4.4 Hubungan *displacement* terhadap densitas relatif minimum

Perbedaan antara densitas relatif tertinggi dan terendah terjadi pada saat *displacement* 0.065 m yaitu 0.1703, pada *displacement* 0.05 perbedaan nilai antara densitas relatif tertinggi dan terendah adalah 0.0936, pada *displacement* 0.04 perbedaan nilai antara densitas relatif tertinggi dan terendah adalah 0.0874, pada *displacement* 0.03 perbedaan nilai antara densitas relatif tertinggi dan terendah adalah 0.0615, sedangkan perbedaan densitas relatif tertinggi dan terendah pada saat *displacement* 0.02 m yaitu 0.0413. Sehingga perbedaan terbesar antara nilai densitas relatif tertinggi dan terendah adalah pada *displacement* 0.065, sedangkan perbedaan terkecil antara densitas relatif tertinggi dan terendah adalah pada *displacement* 0.02. Secara teori dengan semakin meningkatnya *displacement*, yaitu berarti peningkatan tekanan, besar perbedaan antara densitas relatif tertinggi dan terendah semakin kecil. Karena semakin kecil perbedaan distribusi densitas relatif tertinggi dan terendah, semakin seragam distribusi densitas. Pada penelitian ini tidak didapatkan

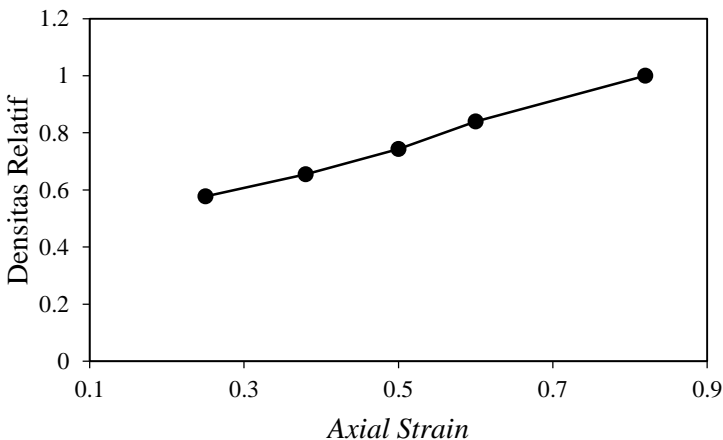


perbedaan densitas relatif antara densitas relatif tertinggi dan terendah terkecil pada *displacement* terbesar yaitu 0.065 m.

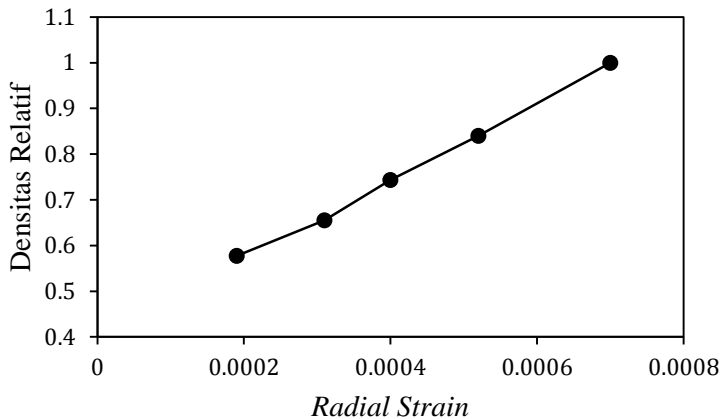
Menurut (German, 1994), proses kompaksi dikatakan berhasil apabila perbandingan antara tinggi dengan diameter sampel (H/D) ≈ 1.5 . Apabila H/D melebihi 5 dapat dikatakan gagal. Pada penelitian ini serbuk memiliki diameter 0.009 m, dan tinggi ≈ 0.08 , maka rasio sampel pada penelitian ini $H/D \approx 8.9$. Dimungkinkan hal ini merupakan salah satu penyebab tidak sesuai hasil simulasi dengan teori.

4.3 Hubungan Regangan Aksial dan Radial terhadap Densitas Relatif

Seperti yang sudah disebutkan diawal, densitas relatif diperoleh dengan mengkonversikan *volumetric strain* ke dalam bentuk densitas relatif. Untuk mengkonfirmasi hal tersebut, *volumetric strain* berkaitan dengan regangan aksial dan regangan radial. Karena *volumetric strain* didefinisikan sebagai jumlah dari *strain* aksial dan *strain* radial



Gambar 4.5 Hubungan *axial strain* terhadap densitas relatif



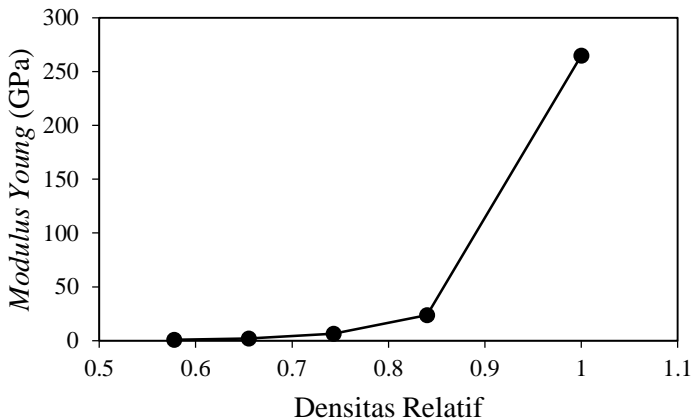
Gambar 4.6 Hubungan *radial strain* terhadap densitas relatif

Pada Gambar 4.5 dapat dilihat tren grafik regangan aksial meningkat seiring dengan meningkatnya nilai densitas relatif. Pada densitas relatif 0.58, 0.66, 0.74, 0.84, dan 1 didapatkan nilai regangan aksial berturut-turut adalah sebesar 0.25, 0.38, 0.5, 0.6, 0.82. Hal yang sama terjadi pada Gambar 4.6 dimana tren grafik menunjukkan bahwa regangan radial meningkat dengan semakin tinggi nilai densitas relatif. Pada densitas relatif 0.58 diperoleh nilai regangan radial sebesar 0.25, pada densitas relatif 0.66 diperoleh nilai regangan radial sebesar 0.38, densitas relatif 0.74 diperoleh nilai regangan radial sebesar 0.5, kemudian pada densitas relatif 0.84 diperoleh nilai regangan radial sebesar 0.6, sedangkan pada saat densitas relatif 1 diperoleh nilai regangan radial sebesar 0.82. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai regangan aksial dan regangan radial, semakin tinggi pula nilai *volumetric strain*, dan semakin tinggi nilai *volumetric strain*, nilai densitas relatif semakin tinggi.



4.4 Hubungan Densitas Relatif terhadap Modulus Young

Modulus young merupakan salah satu parameter penting yang mempengaruhi *yielding* pada serbuk dibawah tegangan hidrostatik dan tegangan geser. Properti *modulus elastisitas* didapatkan dari eksperimen pada saat pelepasan beban (*unloading*) untuk mendapatkan sifat elastis dari serbuk.



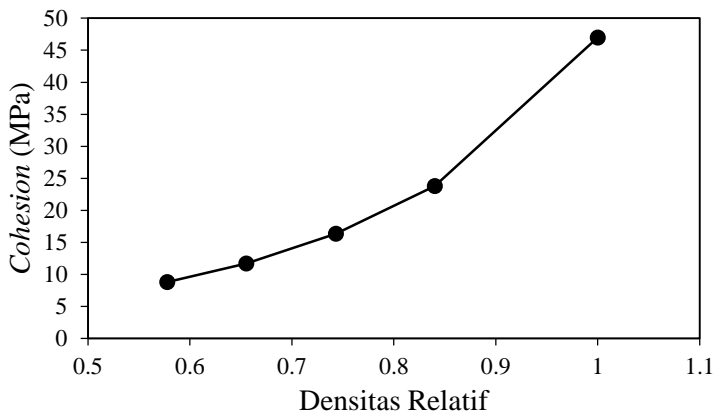
Gambar 4.7 Hubungan densitas relatif terhadap modulus young

Gambar 4.7 menunjukkan variasi modulus young terhadap densitas relatif pada saat tahapan kompaksi. Dengan semakin meningkatnya densitas relatif, semakin meningkat pula nilai modulus young. Pada saat densitas relatif 0.58 diperoleh modulus young sebesar 1×10^9 Pa, pada saat relatif densitas 0.66 diperoleh nilai modulus young sebesar 2×10^9 Pa, pada saat relatif densitas 0.74 diperoleh nilai modulus young sebesar 6.3×10^9 Pa, pada saat relatif densitas 0.84 diperoleh nilai modulus young sebesar 23.8×10^9 Pa, dan pada saat densitas relatif 1 didapatkan nilai modulus young sebesar 266×10^9 Pa. Nilai modulus young pada saat nilai densitas relatif 1 melebihi nilai modulus young logam Cu padat, dan tidak mungkin terjadi. Hal ini diduga karena

terjadi kesalahan pada pendekatan persamaan saat *fitting curve* untuk mendapatkan nilai modulus young awal.

4.5 Hubungan Densitas Relatif terhadap Kohesi

Menurut (Brewin, 2008), kohesi serbuk didefinisikan sebagai kemampuan serbuk untuk menahan geseran selama tahapan kompaksi serbuk. Hal ini disebabkan karena gaya antar-partikel bekerja antara partikel yang saling bersentuhan dan yang berdekatan. Oleh karena itu serbuk dengan nilai kohesi tinggi akan memiliki kompresibilitas yang tinggi pula, karena akan semakin mudah untuk dipadatkan.



Gambar 4.8 Hubungan densitas relatif terhadap kohesi

Menurut (freemantech.co.uk) kompresibilitas merupakan persentase perubahan volum untuk tegangan normal yang diberikan. Serbuk yang lebih kompresibel dapat dipadatkan ke kerapatan yang lebih tinggi sehingga memiliki sifat mekanik yang lebih tinggi pula. Kekohesifan dinyatakan dengan semakin kohesif suatu material, maka semakin sulit suatu material untuk dipisahkan, oleh karena itu serbuk dengan nilai kohesi yang tinggi

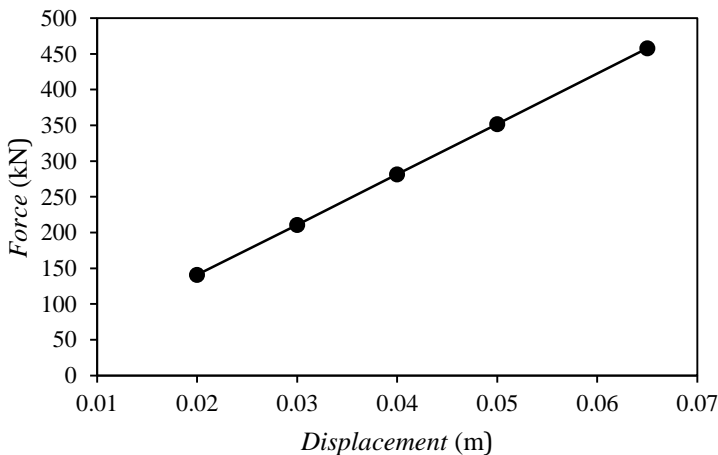


cenderung tidak membentuk retakan (*crack*) (ASM Handbook Vol 7).

Pada Gambar 4.8 dapat dilihat, dengan semakin meningkatnya densitas relatif, semakin tinggi pula nilai kohesi. Pada densitas relatif 0.58 diperoleh nilai kohesi sebesar 8.76 MPa. Lalu pada densitas relatif 0.66 diperoleh nilai kohesi sebesar 11.67 MPa. Densitas relatif 0.74 diperoleh nilai kohesi sebesar 16.34 MPa, dan pada saat densitas relatif 0.84 didapatkan nilai kohesi sebesar 23.79 MPa. Sedangkan pada saat densitas relatif 1 didapatkan kohesi sebesar 46.97 MPa. Hal ini menunjukkan adanya korelasi yang baik antara hasil simulasi dengan teori.

4.6 Prediksi Gaya (*Force*) Kompaksi terhadap Displacement

Pressure didefinisikan sebagai besar gaya pada suatu luasan penampang tertentu. Semakin besar gaya yang diberikan maka semakin besar pula tekanan yang diperlukan.



Gambar 4.9 Prediksi *force* terhadap *displacement*

Pada Gambar 4.9 menunjukkan hubungan antara *displacement* dan *force* pada proses kompaksi. Seperti yang telah



dipaparkan sebelumnya pada persamaan *stiffness* yang diasumsikan sebagai 2 bar antara pendorong dan serbuk, semakin besar *displacement* yang diinginkan maka semakin besar *force* yang diperlukan untuk mencapai *displacement* tertentu. Pada Gambar 4.9 ketika *displacement* sebesar 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.065 m diinginkan, maka diperlukan *force* berturut-turut adalah sebesar 141, 211, 282, 352, dan 458 kN. Hal ini sesuai dengan yang telah dipaparkan sebelumnya, semakin besar nilai *displacement* yang dicapai, semakin besar pula *force* yang diperlukan.



(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Nilai densitas relatif pada *displacement* 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.065 m berturut-turut sebesar 0.58, 0.66, 0.74, 0.84 dan 1. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar *displacement* sebagai fungsi tekanan, maka semakin besar pula nilai densitas relatif.
2. Perbedaan nilai densitas relatif tertinggi dan terendah pada *displacement* 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.065 m berturut-turut sebesar 0.0413, 0.0615, 0.0874, 0.0936, dan 0.1703. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar *displacement* sebagai fungsi tekanan, semakin besar pula perbedaan densitas relatif.

5.2 Saran

1. Dilakukan eksperimen secara langsung untuk mendapatkan properti material yang lebih akurat.
2. Dilakukan validasi dan modifikasi dengan variabel yang lebih bervariasi.
3. Dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan model yang lain.



(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Abdoli, Hamid. 2008. "Study of the Densification of a Nanostructured Composite Powder: Part 1: Effect of Compaction Pressure and Reinforcement Addition". **Material Science and Engineering A486** (1): 624-630.
- Al-Qureshi, H.A. dkk. 2008. "Analisis of The Fundamental Parameter of Cold Die Compaction of Powder Metallurgy". **Journal of Materials Processing Technology** **199**:417-424.
- Bockstiegel, G., Hoganas. 1967. A Simple Formula for the Calculation of Spatial Size Distribution from Data Found by Lineal Analysis. **Stereology**: 193-194.
- Bathe, K.-J. 1996. **Finite Element Procedures**. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Benini, Joseph C. 2001. **Frangible Metal Bullets, Ammunition, and Method of Making Such Articles**. Amerika Serikat. Nomer Paten: US 6,263,798 B1.
- Brewin, P.R., Coube, O., Doremus, P., Tweed J.H. 2008. **Modelling of Powder Die Compaction**. London: Springer.
- Carnavas. P.C., Page. N.W. 1998. "Elastic Properties of Compacted Metal Powder". **Journal of Material Science** **33**: 4647-4655.
- Coube, O., Riedel, H. 2000. "Numerical Simulation of Metal Powder Die Compaction with Special Consideration of Cracking". **Powder Metallurgy**, 43(2), 123-31.
- German, Randall M. 1984. **Powder Metallurgy Science**. USA: Metal powder Industries Federation.
- Heckel, R.W. 1961. "Density-Pressure Relationship in Powder Compaction", **Transaction of the Metallurgical Society of AIME** 221: 671-675.
- Hewitt, R.L., Wallace, W., Demalherbe, M.C. 1974. "Plastic Deformation in Metal Powder Compaction". **Powder Met** 20:199-204.
- Hwan Chung, Suk., Kwon, Y.S., German, Randall M. 2004. "Analysis and Design of a Press-and-Sinter Process for Fabrication of Precise Tungsten Carbide Cutting Tools".

- Advance in Powder Metallurgy and Aprticate Material Part 8:** 26:39.
- Jones D.W. 1960. "Fundamental Principles of Powder Metallurgy". **Edward Arnold Ltd., London, England** 20: 242-370.
- Kelly. 2013. **Solid Mechanics Part I.** New Zealand: University of Auckland.
- Khaidir, Yul. 2003. **Pengaruh Waktu Tahan Sinter terhadap Kekerasan, Densitas/Porositas, Kekuatan Tekan, Kekuatan Aus, dan Struktur Mikro Material Komposit Al-Al₂O₃ Produk Metalurgi Serbuk.** Depok: UI.
- Khoei, Amir R., Azizi, Shaia. 2004. Numerical Simulation of 3D Powder Compaction Processes Using Cone-Cap Plasticity Theory. **Materials & Design** 26:137-147.
- Kwon, Y.S., Hwan Chung, Suk., German, Randall M. 2003."Numerical Analysis and Optimization of Die Compaction Process". **Advance in Powder Metallurgy and Aprticate Material Part 4:** 37-49
- Kwon, Y.S., Lee, H.T., Kim, K.T. 1997. Analysis for Cold Die Compaction of Stainless-Steel Powder. **Journal of Engineering Materials and Technology** 119: 366-373.
- Lammens R.F., Liem, T.B., Polderman, J., De, Blaey. 1980. "Evaluation of Force-Displacement Measurements during One Sided Powder Compaction in a Die-the Influence of Friction with the Die Wall and of the Diameter of Punches and Die on Upper and Lower Punch Pressure". **Powder Tech** 26:169-185.
- Kruachaturrat, S dkk. 2009. "Sintering Cu-Sn Materials for Frangible Bullets." **The 3rd Thailand Metallurgy Conference (TMETC-3): Metallurgical Research for Thailand Development.** Bangkok:Thailand.
- Marais, P.G. 1996. **A New Constitutive Model for the Finite Element Analysis of Metal Powder Compaction.** South Africa: University of Cape Town.
- Mikko, Don., Michael Kelley dan Jerry Miller. 2008. "Frangible Bullets, Dynamic Research Technolgies". **AFTE Journal- Volume 40** Number 1—Winter.

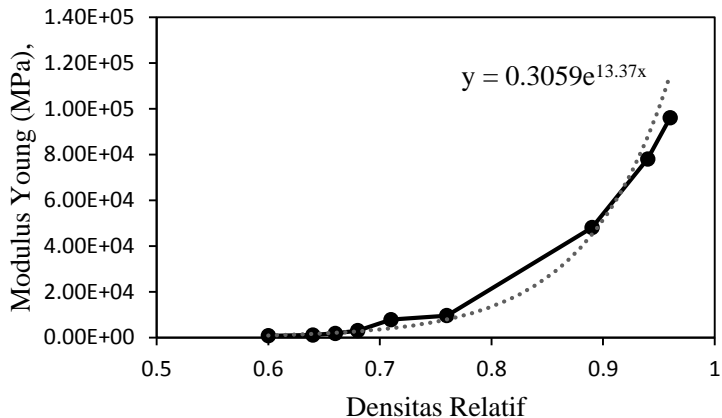
- Mikko, Don and Collins John M. 2000. **U.S. Military Green Bullet**. <URL: http://www.firearmsid.com/Feature_Articles/GreenBullets/GreenBullets.htm>
- Moaveni, Saeed. 1999. **Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS**. USA: Minnesota State University.
- Duwez, P., Zell, L. 1949. "Pressure Distribution in Metal Powder Compact". **AIME** **185**:137-144.
- Schlieper, G., Mascerahanas, J. 2000. "High Strength MIM Materials". **Proceeding Second European Symposium on Powder Injection Molding**. Munich, Oct 18-20.
- Selig, Stanley. 2012. **Finite Element Simulation of the Compaction and Springback of an Aluminium Powder Metallurgy Alloy**. Canada: Dalhousie University.
- Sweeney, Theodore. 2010. **Infusion Cap**. Amerika Serikat. Nomer Paten: US 5927549.
- Tabata, T., Masaki, S., K. Kamata.1981. "Coefficient of Friction between Metal Powder and Die Wall during Compaction". **Powder Met Inter.** **13**:179-182.
- Upadhyaya. G.S. 2002. **Powder Metallurgy Technology**. England: Cambridge International Science Publishing.
- Vyal. E. Yu., Laptev A.M. 2002. "Strength of Unsintered Powder Compacts with Axial and Radial Loading". **Powder Metallurgy and Metal Ceramic** **41**: 5-6.
- _____.2017.<URL:http://www.freemantech.co.uk/_powders/powder-testing-external-variables>
- _____. 1992. **ASM Metal Handbook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. Ohio: ASM International.
- _____. 1998. **ASM Metal Handbook Volume 7 Powder Metal Technologies and Applications**.Ohio: ASM International.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

1. *Fitting Curve* Nilai Properti Material

1.1 Properti Modulus Elastisitas



Gambar 1 Hubungan Relatif Modulus Elastisitas terhadap Relatif Densitas Pada Spesimen ○ SS dan □ Copper (Sumber: Carnavas, 1998)

Perhitungan nilai properti modulus elastisitas awal pada relatif densitas awal (0.449) berdasarkan grafik adalah sebagai berikut:

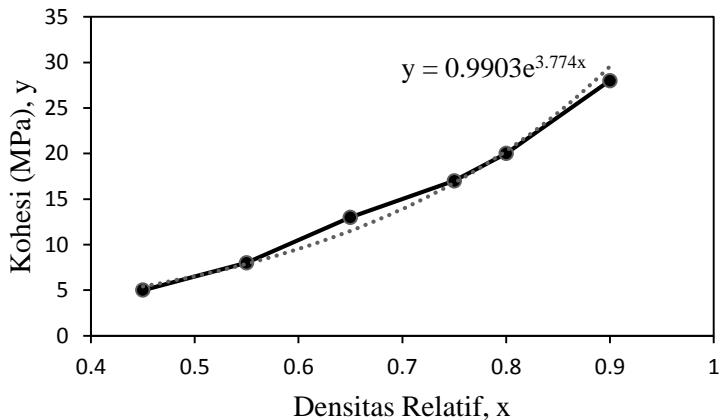
$$y = 305916e^{13.37x}$$

$$y = 305916e^{(13.37)(0.449)}$$

$$y = 123.8 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Sehingga didapatkan nilai modulus elastisitas awal untuk material serbuk *copper* pada relatif densitas awal 0.449 adalah sebesar $123.8 \times 10^6 \text{ Pa}$.

1.2 Properti Material Serbuk *Cohesion*



Gambar 2 Hubungan *Cohesion* terhadap *Relative Density* Pada Spesimen Copper (Sumber: E. Yu. Vyal, 2002)

Perhitungan nilai properti *cohesion* pada relatif densitas awal (0.449) berdasarkan grafik adalah sebagai berikut:

$$y = 0.9903e^{3.774x}$$

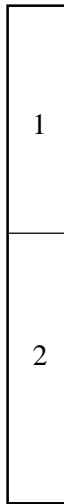
$$y = 0.9903e^{(3.774)(0.449)}$$

$$y = 5.4 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Sehingga didapatkan nilai *cohesion* untuk material serbuk *copper* pada relatif densitas awal 0.449 adalah sebesar $5.4 \times 10^6 \text{ Pa}$

2. Perhitungan *Force-Displacement* dengan Metode *Stiffness*

Komponen serbuk dan pendorong diasumsikan sebagai 2 bar.



Pendorong:

$$k_1 = \frac{E_1 A_1}{L_1}$$

Serbuk:

$$k_2 = \frac{E_2 A_2}{L_2}$$

$$k_1 = \frac{E_1 A_1}{L_1} = \frac{(200 \times 10^9)(0.00445)}{(0.08)} = 11.125 \times 10^9$$

$$k_2 = \frac{E_2 A_2}{L_2} = \frac{(123.8 \times 10^6)(0.0045)}{(0.07957)} = 7 \times 10^6$$

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$$

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{11.125 \times 10^9} + \frac{1}{7 \times 10^6}$$

$$\frac{1}{k_s} = \frac{7 \times 10^6 + 11.125 \times 10^9}{77.875 \times 10^{15}}$$

$$\frac{1}{k_s} = \frac{11,132 \times 10^9}{77.875 \times 10^{15}}$$

$$\frac{1}{k_s} = 142 \times 10^{-9}$$

$$k_s = 7,042 \times 10^6$$

$$F = \Delta x k_s$$

a. Pada *displacement* (Δ) = 0.02 m

$$F = (0.02) (7,042 \times 10^6)$$

$$F = 140.840 \text{ N}$$

$$F = 141 \text{ kN}$$

b. Pada *displacement* (Δ) = 0.03 m

$$F = (0.03) (7,042 \times 10^6)$$

$$F = 211.260 \text{ N}$$

$$F = 211 \text{ kN}$$

c. Pada *displacement* (Δ) = 0.04 m

$$F = (0.04) (7,042 \times 10^6)$$

$$F = 281.680 \text{ N}$$

$$F = 282 \text{ kN}$$

d. Pada *displacement* (Δ) = 0.05 m

$$F = (0.05) (7,042 \times 10^6)$$

$$F = 352.100 \text{ N}$$

$$F = 352 \text{ kN}$$

e. Pada *displacement* (Δ) = 0.065 m

$$F = (0.065) (7,042 \times 10^6)$$

$$F = 458 \text{ kN}$$

(halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada pembuatan laporan tugas akhir ini penulis mendapat banyak bantuan dari berbagai pihak, pada kesempatan kali ini penulis ini mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Berkuasa atas segala sesuatu, karena berkat kuasa-Nya lah penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
2. Bapak, Ibu, Vera serta keluarga yang selalu mendoakan penulis dan memberikan semangat, motivasi, dukungan, perhatian, pengertian serta cinta kasih.
3. Ibu Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si dan Bapak Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., PhD selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah banyak memberikan bimbingan dan pelajaran yang tak akan pernah ternilai harganya kepada penulis disela-sela kesibukan Beliau, sehingga terselesaikanlah laporan ini.
4. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS, dengan sangat sabar dan santun dalam memimpin jurusan tercinta ini.
5. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS, yang telah banyak mencurahkan waktu, tenaga, serta pikiran untuk *handle* segala sesuatu mengenai tugas akhir dari A-Z.
6. Ibu Amaliya Rasyida, ST., M.Sc. selaku dosen wali yang sangat mengayomi selama penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, serta sebagai penguji saat sidang tugas akhir yang sangat membangun.
7. Ibu Rindang Fajarin, S.Si., M.Si selaku dosen penguji saat sidang tugas akhir, yang telah sangat cermat dan teliti dalam mengkoreksi laporan tugas akhir sehingga sangat membantu dalam penyusunan laporan dengan baik.
8. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah membimbing penulis hingga terciptanya laporan ini.
9. Ramadhan Putra Narindra, yang selalu ada saat suka dan duka, selalu ada untuk menemani dan menghibur dikala sedang *down*. Terima kasih atas perhatian dan kasih sayang yang sangat luar biasa.

10. Sahabat terbaik, Mia, Mustika yang sudah penulis anggap seperti kakak sendiri, terima kasih telah mengayomi dan memberikan *support* kepada penulis
11. Sahabat seperjuangan 2 semester tugas akhir: Rizki dan Hamzah. Terima kasih kalian luar biasa!
12. Adik tingkat terbaik: Habib dan Sochi, terima kasih atas banyak bantuan yang telah kalian beri, perhatian dan kesedian untuk menemani *sleep over night* di lab saat *deadline* di depan mata.
13. Sahabat seperjuangan TA Lab Fisika Material (re:SAC): Jonas, Fiqi, Peniel, Kholid, dan Ila.
14. Sahabat seperjuangan TA Lab Komputasi, Asad, Fadli, Greggy dan Gentong.
11. Mas Ghulam yang sudah seperti pembimbing ketiga, yang telah bersedia meluangkan waktu untuk membimbing dan mengoreksi laporan tugas akhir.
12. Teman-teman seperjuangan MT15 yang memberikan banyak cerita dalam kehidupan penulis. Terimakasih reks, see u on top!
13. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.
14. Dan yang terakhir yaitu kepada tugas akhir itu sendiri yang telah menjadi perantara Allah untuk mengajarkan kepada penulis berbagai pelajaran hidup yang tak akan pernah ternilai harganya. Terima kasih telah menjadi bagian cerita seru dalam perjalanan hidupku, cinTA.

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Klaten pada tanggal 1 April 1996. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Sri Mulyono dan Mujinem. Riwayat pendidikan yang ditempuh oleh penulis, yaitu antara lain SD Negeri Juwiring, SMP Negeri 1 Delanggu, SMA Negeri 1 Klaten, dan sekarang melanjutkan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama berkuliah di Kampus Perjuangan ini, penulis mengikuti kegiatan seminar, pelatihan dan organisasi. Penulis pernah menjadi Staff Kementerian Inovasi Karya BEM ITS 2014/2015. Setelah itu, penulis pernah menjabat sebagai Sekretaris Divisi Kawal PKM Klub Keilmiahan BEM ITS 2015/2016, dan menjabat sebagai Kepala Ketua Keputrian LDJ Ash-Haabul Kahfi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi 2015/2016. Selain itu, penulis pernah menjadi bagian dari Asisten Laboratorium Fisika Material.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT. Timah Tbk unit Kundur yang dilaksanakan pada bulan Juni – Juli 2016. Pada saat kerja praktek, penulis mendapatkan topik mengenai “Analisis Pendugaan Model Empiris Material *Backlog* Dalam Proses Peleburan Timah di PT. Timah (Persero) Tbk”. Sedangkan tugas akhir yang dikerjakan oleh penulis ini berjudul “Simulasi Numerik Pengaruh Variasi Tekanan Terhadap Distribusi *Green Density* Pada Kompaksi Serbuk Cu-10%wtSn Dengan Metode Elemen Hingga”.

Email: deshinta.ikasari@gmail.com

(halaman ini sengaja dikosongkan)